

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Институт электронного обучения  
 Специальность 280202.65 «Инженерная защита окружающей среды»  
 Кафедра экологии и безопасности жизнедеятельности

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>Усовершенствование газопылевого оборудования в цехе обжига концентрата на цинковом заводе</b>

УДК 621.928.9:669.53-048.35

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-9601	Турдыева Мадина Бахадыровна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Василевский Михаил Викторович	к.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Наталья Геннадьевна			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сечин Андрей Александрович	к.т.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭБЖ ИНК ТПУ	Романенко Сергей Владимирович	д.х.н.		

**Томск – 2016 г.**

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт электронного обучения  
 Специальность 280202.65 «Инженерная защита окружающей среды»  
 Кафедра экологии и безопасности жизнедеятельности

УТВЕРЖДАЮ:  
 Зав. кафедрой ЭБЖ  
 С.В. Романенко

\_\_\_\_\_  
 (Подпись) (Дата)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

**Дипломной работы**

Студенту:

Группа	ФИО
3-9601	Турдыева Мадина Бахадыевна

Тема работы:

<b>Усовершенствование газопылевого оборудования в цехе обжига концентрата на цинковом заводе</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	14.04.2016 №2870/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	03.06.2016
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b> <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Объектом исследования является газопылевое оборудование цех обжига концентрата цинкового завода.  Литературные источники, материалы преддипломной практики.
--	---

<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	Характеристика системы газопылеочистки цеха обжига концентрата.  Анализ экологических характеристик технологических схем обезвреживания газов и газоочистительной аппаратуры.  Варианты технических решений по уменьшению выбросов вредных веществ в атмосферный воздух рабочей зоны. Контроль газоочистительных систем.
---	--

	<p>Финансовые и ресурсоэффективные и ресурсосберегающие расчеты.</p> <p>Социальная ответственность.</p>
<p><b>Перечень графического материала</b> (с точным указанием обязательных чертежей)</p>	<p>Схема обеспыливания отходящих газов обжиговых печей кипящего слоя цинкового производства (а - с охлаждаемыми стояками, б - с котлом-утилизатором.)</p> <p>Схема очистки газов, печей сушки цинковых концентратов; Схема очистки газов печи КС для обжига цинковых концентратов;</p> <p>Технологическая схема цинкового производства представлена; Схема цепи аппаратов обжигового цеха ЦЗ; Схема обжигового цеха; Схема линий тока газа в противоточном коническом циклоне;</p> <p>Схема циклонов серии ЦН;</p> <p>Фракционная эффективность циклонов ЦН;</p> <p>Зависимость фракционной эффективности обеспыливания газов от показателя <math>\alpha</math>;</p> <p>Принципиальная схема пыле- и золоулавливания (КПЗУ); Вихревой сепаратор-осадитель с прямоточным пылеконцентратором;</p> <p>Прямоточный пылеконцентратор; Фракционный унос пыли из вихревого пылеуловителя;</p> <p>Фракционная эффективность системы пылеулавливания.</p>
<b>Консультанты по разделам дипломной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Старший преподаватель кафедры менеджмента, Кузьмина Наталья Геннадьевна
Социальная ответственность	Кандидат технических наук, Сечин Андрей Александрович

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	14.04.2016
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Василевский Михаил Викторович	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-9601	Турдыева Мадина Бахадыровна		

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ**  
**ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт электронного обучения  
 Специальность 280202.65 «Инженерная защита окружающей среды»  
 Уровень образования: Специалитет  
 Кафедра экологии и безопасности жизнедеятельности  
 Период выполнения (осенний/весенний семестр 2015/2016 учебного года)

Форма представления работы:

<b>Дипломная работа</b>
-------------------------

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН**  
**Выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполняемой работы:		03.06.2016
<b>Дата контроля</b>	<b>Название раздела модуля)/ вид работы (исследования)</b>	<b>Максимальный балл раздела (модуля)</b>
04.02.2016	Получение и выдачи задания	10
05.02.2016	Подбор и изучение литературы для написания проекта	10
23.02.2016	Анализ эффективности существующей системы пылегазоочистки после системы печи обжига цинкового концентрата	15
03.03.2016	Сравнение и изучение пылеулавливателей	10
05.03.2016	Предложена система с вихревым разгрузителем потока, двойным концентрированием пыли и выносными циклонами пылеулавливателями	20
13.03.2016	Расчет эффективности промышленной системы пылегазоочистки	15
14.03.2016	Сделан вывод по оценке эффективности пылеулавливания с учетом эффективности электрофилтра.	10
15.03.2016	Консультация с научным руководителям	10

Составил преподаватель:

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Василевский М.В.	к.т.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

<b>Зав. кафедрой</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
ЭБЖ ИНК ТПУ	Романенко С.В.	д.х.н.		

# ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-9601	Турдыева Мадина Бахадыровна

Институт	Электронного обучения	Кафедра	Экологии и безопасности жизнедеятельности
Уровень образования	Специалитет	Направление / специальность	Инженерная защита окружающей среды

## Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Зарботная плата инженера = 38657 рублей Зарботная плата научного руководителя = 6891 рублей
2. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Социальные отчисления = 235800 рублей

## Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Составление бюджета инженерного проекта (ИП)	1. Формирование плана разработки проекта 2. Смета затрат на проект 3. Расчет социального эффекта
---	--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	14.04.2016
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель кафедры менеджмент	Кузьмина Наталья Геннадьевна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-9601	Турдыева Мадина Бахадыровна		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
3-9601	Турдыева Мадина Бахадыровна

<b>Институт</b>	<b>Электронного обучения</b>	<b>Кафедра</b>	<b>Экологии и безопасности жизнедеятельности</b>
<b>Уровень образования</b>	<b>Специалитет</b>	<b>Направление/специальность</b>	<b>Инженерная защита окружающей среды</b>

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является цинковый завод цех обжига концентрата (пылегазоочистное оборудование) для использования очистки технологических газов от обжиговых печей.
--	--

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<b>1. Производственная безопасность</b> 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности: <ul style="list-style-type: none"> <li>– физико-химическая природа вредности;</li> <li>– её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты;</li> <li>– (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).</li> </ul>	Выявленным вредным факторам может, является: <ul style="list-style-type: none"> <li>- запыленность;</li> <li>- загазованность;</li> <li>- микроклимат</li> <li>- вибрация;</li> <li>- шум;</li> <li>- ГОСТ 12.0.003-74 «ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация».</li> </ul>
1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности: <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– термические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</li> </ul>	К выявленным опасным факторам могут, является: <ul style="list-style-type: none"> <li>- термические опасности (ожог);</li> <li>- электробезопасность;</li> <li>- пожарная безопасность;</li> <li>- взрывобезопасность;</li> </ul>
<b>2. Экологическая безопасность:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– защита селитебной зоны</li> <li>– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> </ul>	Рассматривается воздействие промышленного оборудования на окружающую среду, человека и общество.

<ul style="list-style-type: none"> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> <li>– разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</li> </ul>	
<b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;</li> <li>– выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>– разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>– разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>	<i>Рассматриваются возможные чрезвычайные ситуации на цехе сотрудников производства и возможные превентивные меры по предотвращению ЧС.</i>
<b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<i>Рассматриваются правовые и организационные мероприятия по обеспечению безопасности на цехе.</i>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	<b>14.04.2016</b>
---	-------------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сечин Андрей Александрович	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-9601	Турдыева Мадина Бахадыровна		

## РЕФЕРАТ

Дипломная работа специалиста на тему «Усовершенствование газопылевого оборудования в цехе обжига концентрата на цинковом заводе» АО «Алмлаыкского горно металлургического комбината» состоит из текстового документа, выполненного на 106 страниц, демонстрационных листов. Текстовый документ содержит 17 рисунков, 16 таблиц, список использованных источников из 30 наименований, 4 приложений.

Ключевые слова: загазованность, запыленность, очистка, сушка, циклоны, агломерация, обжиг, обезвреживания.

Цель дипломной работы: анализ существующей системы обеспылевания газов, усовершенствование механической системы газоочистки на цинковом заводе обжигового цеха.

Поставлены следующие задачи:

- Провести анализ гидродинамических режимов системы обжига концентрата и очистки газов;
- Провести анализ различных типов пылеулавителей применительно к процессу очистки газов в обжиговом цехе;
- Выполнить усовершенствование основных узлов систем газоочистки в обжиговом цехе.

Новизна работы: разработаны новые технические решения по обеспылеванию газов в системах технологии обжига цинкового концентрата, проведены расчеты новой механической системы газоочистки.

Проект выполнен с использованием литературных источников и материалов преддипломной практики.

Дипломная работа оформлена в текстовом редакторе Microsoft Word XP и представлена в распечатанном виде на листах формата А4.



## Оглавление

Реферат.....	8
Введение (краткая характеристика цинкового производства).....	11
1 Технологическая схема обжига концентрата и характеристика газопылевыделений.....	17
1.1 Очистка газов при сушке и обжиге концентратов.....	19
1.2 Аппаратурно-технологическая схема очистки отходящих газов сушильных барабанов.....	21
1.3 Аппаратурно-технологическая схема, очистки отходящих газов печей обжига цинковых концентратов.....	24
1.4 Утилизация тепла отходящих газов.....	26
1.5 Отделение сухих электрофильтров.....	27
1.6 Транспортировка продуктов обжига.....	27
1.7 Контроль газоочистительных систем.....	28
2 Технологическая схема цинкового производства .....	35
3 Сравнительная характеристика газоочистительной аппаратуры.....	37
3.1 Физико-химические свойства пыли.....	37
3.2 Центробежные пылеуловители.....	48
3.3 Оценки эффективности циклонов.....	54
3.4 Электрофильтры.....	57
4 Реконструкция промышленной установки .....	59
4.1 Расчет промышленной системы газоочистки .....	60
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	73
5.1 Перечень работ и оценка времени их выполнения.....	73
5.2 Смета затрат на проект .....	74
5.3 Смета затрат на реконструкцию оборудования.....	76
5.4 Социальный эффект.....	77
6 Социальная ответственность .....	80

6.1	Производственная безопасность.....	80
6.2	Экологическая безопасность .....	92
6.3	Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	93
6.4	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	96
	Заключение .....	98
	Список использованных источников.....	100
	Приложение А .....	103
	Приложение Б.....	104
	Приложение В .....	105
	Приложение Г .....	106

## **Введение (краткая характеристика цинкового производства)**

Началом летописи Алмалыкского горно-металлургического комбината можно считать год, когда пятилетним планом было намечено строительство медеплавильного комбината на базе медно-молибденового месторождения Кальмакыр, открытым геологами вблизи города Алмалык. В 1940 году была составлена карта-планировка будущего города и комбината, в котором предусматривалось проживание 25 тысяч человек. Вторая мировая война помешала строительству. Но в январе 1945 года по приказу Народного комиссара цветной металлургии было учреждено управление «Алмалыкстрой», созданный для строительства Алмалыкского медькомбината.

В июне 1948 года в продолжение работы начатой Советом Министров было подписано постановление о строительстве свинцово-цинкового завода. В первой половине 1949 года были произведены проектно-изыскательные работы, во втором было начато строительство свинцово-цинкового рудника на месторождении Алтын-Топкан, обогатительной фабрики и рабочего поселка в районе Акмечеть.

Вскоре рядом с медно-молибденовым месторождением геологи обнаружили залежи свинцово-цинковых руд месторождения в Кургашинкан. В связи с этим строительство свинцово-цинковой обогатительной фабрики (СОФ) и Цинковый завод (ЦЗ) был перемещен на площадку строящегося вблизи Алмалык, чтобы обогащать в нем руды сразу двух рудников: Кургашинкан и Алтын-Топкан. Первые продукции нового производства было получено в 1954 году.

5 июня 1967 года директор Алтын-Топканского свинцово-цинкового комбината П.С. Поклонский издал приказ на основании приказа Министерства цветной металлургии от 7 июня 1967 года, согласно которому комбинат был переименован в Алмалыкский горно-металлургический комбинат. Это соответствовало и профилю, и месту рождения предприятия, которое к этому времени заслуженно называли флагманом цветной металлургии республики.

Цинковый завод АГМК состоит из 7 основных и 5 вспомогательных служб.

К основным цехам относятся:

- обжиговой цех;
- сернокислотный цех;
- цех выщелачивания;
- цех вельцевания;
- электролитный цех;
- кадмиевый цех;
- участок по получению чернового свинца (в настоящее время участок законсервирован).

К вспомогательным службам относятся:

- энергетический цех;
- транспортно-хозяйственная служба;
- ремонтно – механический участок;
- хим. лаборатория.

Основной задачей цинкового завода является выпуск цинка металлического, кадмия металлического, серной кислоты, свинца марки СЗС и других попутных материалов.

Первоначально цинковый завод назывался Сернокислотным комплексом, состоящим из сернокислотного и обжигового цехов, производящих серную кислоту для медеплавильного завода Горно Металлургического Комбината. Строительство этих цехов началось в 1959 году в соответствии с распоряжением Совета Министров от 15 мая 1958 года по разработке технического проекта «Гипроцветмета». Окончание строительства было зарегистрировано розжигом КС, которую предварительно сушили в течении трех суток и запустили в работу 26 апреля 1963 года.

Первоначальным сырьем служил пиритный концентрат, а ко дню солидарности всех трудящихся 1 мая была получена первая серная кислота. Народно-хозяйственным планом было предусмотрено в 1970 году ввести в

эксплуатацию цинковый завод с целью получения металлического цинка. В связи с этим в обжиговом цеху произведена громадная реконструкция и цех перешел на переработку сульфидного сырья в печах КС, где цинк переводится в растворимую форму  $ZnO$  (огарок), построены котлы утилизаторы.

Первый катодный цинк путем электролиза был получен в октябре 1972 года, и направлен на переправку, где через неделю была получена первая товарная продукция цинкового завода в виде чушкового металлического цинка. Химические анализы показывали, что в исходном сырье находятся в достаточном количестве и другие цветные металлы, такие как кадмий, свинец, медь, индий. Цинковый завод получил задание на извлечение этих металлов. Первый металлический кадмий на цинковом заводе был получен 3 марта 1980 года, а первый индий в январе 1982 года. Первый свинец на цинковом заводе был получен 17 мая 2004 году с рудно-термической печи РКО 2,5 из техногенных отходов цинкового и медного производства комбината, что является новым технологическим решением не только Республике, но и в мире.

Способы получения цинка разделяются на две основные группы: пирометаллургические и гидрометаллургические. До 1915г. применяли исключительно пирометаллургический способ, основанный на дистилляции цинка из обожженного концентрата в смеси с восстановителем паров металла.

После 1915г. быстро распространился гидрометаллургический способ, сущность которого заключается в выщелачивании обожженного концентрата слабым раствором серной кислоты и электролитическом осаждении металла из сульфатного раствора. Вначале обжиг концентратов вели в многоподовых механических печах, используемых на пирометаллургических заводах. Несмотря на серьезные усовершенствования, внесенные в конструкцию многоподовых печей, последние не удовлетворяли всем требованиям производства. Поэтому в начале тридцатых годов на ряде заводов стали переходить к более прогрессивному методу обжига во взвешенном состоянии и в последние годы широко нашло своё применение практика обжига концентрата в кипящем слое.

Впервые в СССР промышленная печь для обжига цинковых концентратов в кипящем слое была построена и освоена на заводе «Электроцинк» в 1955 году. Исторически первым способом, как было сказано выше, был пирометаллургический [1]. Технология способа и аппаратное оформление процесса связаны с особенностями восстановления цинка из оксида. Восстановление оксида цинка до металла углеродом и СО происходит при температуре  $1\ 000 - 1\ 100^{\circ}\text{C}$ , а температура кипения получаемого при этом цинка  $906^{\circ}\text{C}$ .

Реакции восстановления сопровождаются выделением газообразного цинка, его возгонкой (дистилляцией). Компоненты пустой породы остаются при этом в твердом виде. Концентрацией паров можно получить жидкий металлический цинк.

#### *Методы очистки газов на предприятии*

На цинковом производстве основные газы, очищаемые от пыли, это газы печей кипящего слоя и трубчатых печей (вельц-печей). Газы обжиговых печей используются для производства серной кислоты и очищаются дополнительно от капель серной кислоты, мышьяка и селена [1, 2].

Газы печей КС характеризуется высокой температурой, большой запыленностью и содержанием окислов серы. Количество отходящих газов от одной печи составляет до  $20\ 000\ \text{м}^3/\text{ч}$ ; вынос пыли достигает 40%.

Схема очистки и охлаждения газов: предварительное охлаждение их в стояках до  $400 - 450^{\circ}\text{C}$ , грубая очистка в циклонах, тонкое обеспыливание в электрофильтрах (рис. 1, а).

Иногда перед охлаждающим стояком ставится пылевая камера для улавливания наиболее крупных частиц [1, 2].

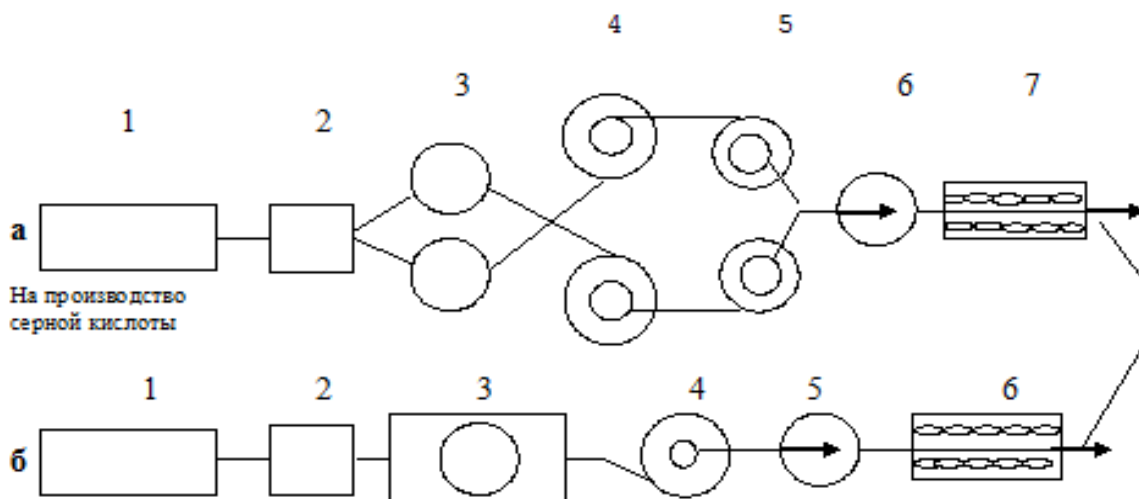
Циклоны komponуют в группы, размещают их последовательно и параллельно. В большинстве случаев применяют циклоны НИИОГАЗ, СИОТ, ЛИОТ. На каждую печь устанавливают по два циклона или по четыре (по два последовательно), из которых два первых по ходу газов имеет большой

диаметр, а последующие два – меньший. После циклонов запыленность газов составляет 3–6 г/м<sup>3</sup> [1, 2]. Они подаются эксгаустерами в сухие электрофильтры.

Во избежание конденсации паров серной кислоты и коррозии металлических элементов температура в электрофильтре не должна быть ниже 220 – 240° С.

Эффективность электрофильтра определяется скоростью газа, удельным электрическим сопротивлением частиц. В хорошо отлаженных электрофильтрах концентрация частиц составляет около 0,1 г/м<sup>3</sup> [1, 2]. В последних компоновках применяются схемы очистки от пыли с заменой пылевой камеры, стояков и одной ступени циклонов котлом – утилизатором туннельного типа (рис. 1, б) [1, 2]. Некоторое количество пыли осаждается в объеме котла, при этом вырабатывается пар, используемый для питания эжекторов и в технологии. Газы, поступающие на производство серной кислоты подвергаются дополнительной очистки от пыли, от соединений мышьяка (As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и селена (SeO<sub>2</sub> и от тумана серной кислоты.

Схема очистки состоит из промывной башни, промывной колонны, двух ступенчатых свинцовых фильтров типа ШМК.



**Рисунок 1** - Схема обеспыливания отходящих газов обжиговых печей кипящего слоя (а - с охлаждаемыми стояками, б - с котлом-утилизатором):

1- печь; 2 – пылевая камера; 3 – охлаждаемый стояк; 4 – группа циклонов;  
5 - вентилятор; 6 – сухой электрофильтр; 7 – туннельный котел утилизатор,  
осадительными электродами в виде шестигранных сот, размещенных в  
стальном футерованном корпусе.

В электрофильтрах первой ступени улавливают основную массу крупных  
капель сконденсировавшихся соединений мышьяка и селена, а также тумана  
серной кислоты [1]. После второй ступени очистки в мокрых электрофильтрах  
газы практически не содержат пыли и соединений мышьяка и селена.  
Содержание в них тумана серной кислоты не должно превышать  $0,005 \text{ г/м}^3$ .



## 1 Технологическая схема обжига концентрата и характеристика газопылевывделений

Основными технологическими операциями при переработке цинковых концентратов, связанными со значительным выделением вредных примесей в атмосферу, является сушка и обжиг концентратов. Полученные при обжиге оксидные соединения цинка перерабатывают преимущество путем растворения огарка в серной кислоте, очистка растворов сульфата цинка от примесей и электролиза  $ZnSO_4$ . Обжиговой цех включает в себя фильтровально – сушильное, печное отделения, отделение электрофильтров ГК-30, отделения подготовки сырья и шихты.

Различают три состояния слоя:

- фильтрующий слой;
- кипящий слой;
- слой во взвешенном состоянии.

В обжиговом цехе производится обжиг привозного сульфидного сырья в печах кипящего слоя типа КС. Сернистый газ, получаемый в процессе обжига сульфидного сырья, проходит очистку в системе котла-утилизатора УККС 6/40 и направляется в сернокислотный цех для дальнейшего получения серной кислоты.

Наименование всего продукта

Огарок	65 %
Пыль из циклонов	29 %
Пыль из электрофильтра	4 %
Пыль газоходов	2 %

Огарок и пыль, с содержанием цинка 50–60% системами пневмотранспорта направляется в цех выщелачивания. При нарушении технологического процесса обжига в атмосферу рабочих мест, возможно, выделение: сернистого газа, ПДК –  $10 \text{ мг/ м}^3$ ;

пыли огарком, ПДК –  $6,0 \text{ мг/ м}^3$ .

Сульфидное сырье поступает на склад концентратов обжигового цеха в полувагонах, грузоподъемность 60 тонн, и разгружается двумя мостовыми грейферными кранами грузоподъемностью 5 тонн в различные отсеки, предназначенные для складирования цинкового концентрата.

Согласно химическим анализам грейферными кранами производится шихтовка (перемешивание) различных концентратов для оптимального количественного и качественного состава сырья. В результате чего полученная шихта подается через дисковую дробилку по наклонным конвейерам № 1 и 2 на отметку +20 м. обжигового отделения. Обжиговое отделение имеет четыре печи кипящего слоя «КС», в которых производится обжиг шихты, с целью удаления вредных примесей с концентрата и увеличения содержания полезных металлов в ней. В процессе работы печи встречается явление "помпажирования", при котором периодически через 1–2 секунды происходит колебание давления воздуха в воздушной коробке на 100–150 мм вод.ст. [3]. В это время просыпается огарок в воздушную коробку (за 6 часов 10 –12 тонн) и за счет воздушных толчков происходит большой пылеунос (до 70% загружаемого материала). Появление помпажирования вызывается следующими причинами [3]: происходят кратковременные изменения сопротивления кипящего слоя, что влечет за собой изменение расхода воздуха, нарушение воздушного режима воздухоудовки, имеет место поршневая подача воздуха в слой; "Помпажирование" чаще всего происходит в момент пуска печи при малом слое материала в период воспламенения [3], так как резко изменяются температура, объем и сопротивление слоя.

С отметки +20 м. шихта ленточными питателями подается в течку «трубу загрузки» печей КС, где при температуре 950–1050 градусов Цельсия производится обжиг. Полученный в результате обжига продукт–огарок по скребковым конвейерам №№ 1, 2 подаются на элеваторы №1 и №2, находящиеся на отметке +11 м., которые наполняют накопительные бункера отделения пневмотранспорта огарком.

В отделении пневмотранспорта огарок с помощью пневмонасосов, работающих на сжатом воздухе по трубопроводам диаметром 159 мм. транспортируется в цех выщелачивания для последующего получения цинка. Котельное отделение обжигового цеха состоит из четырех котлов утилизаторов УККС 6/40, которые очищают отходящие газы с печей КС от 80% пыли. Так как процесс обжига сульфидного концентрата производится при большой температуре, то на котлах УККС 6/40 вырабатывается пар для собственных нужд цинкового завода. После котлов утилизаторов сернистый газ проходит очистку в циклонах типа СИОТ и с помощью огромных вентиляторов «экспаустеров» подается в коллектор грязного газа, а оттуда на электрофильтра.

Электрофильтра ГК-30 предназначены [4, 5] для тонкой очистки сернистого газа, которая происходит за счет электромагнитных свойств осадительных и коронирующих электродов, на которые оседает цинковая пыль, а чистый газ проходя дополнительную очистку в коллекторе чистого газа поступает в промывное отделение сернокислотного цеха, где из него получают сернистую кислоту. Воздуходувное отделение обжигового цеха предназначено для питания печей КС воздухом, который необходим для горения и образования псевдоожиженного слоя. Для этого в воздуходувном отделении установлены три нагнетателя типа 700–11–1. Электроприводом нагнетателя является 6 кВт двигатель мощность 450 кВт. Воздух так же необходим для охлаждения печи КС и аэро-водо-холодильника.

### **1.1 Очистка газов при сушке и обжиге концентратов**

Концентраты с содержанием влаги более 12% сушат в специально приспособленных барабанных вращающихся печах. Печи для сушки концентратов обычно устанавливают в непосредственной близости от склада концентратов. Длина железного барабана достигает 10–12 м, диаметр 1,5 – 1,8 м. Барабаны делают клепаными или сварными без внутренней футеровки [2]. Угол к горизонтальной оси равен 5–6°. Скорость вращения 4 об/мин. Для лучшего перемешивания материала внутри барабана устраивают насадки

различной формы. Отопление сушильных барабанов может быть угольное, мазутное или газовое. Для отопления барабана в переднем приподнятом конце устраивают топку, в которой сжигается топливо. В этой же части барабана производится загрузка концентрата. Топочные газы с температурой 750–800° С входят в барабан и движутся в нем вместе с концентратом к нижнему разгрузочному концу. Такой способ сушки, когда газы и материалы движутся в печи в одном направлении, называют прямоточным. При этом способе влажные комки концентрата, находясь в контакте с горячими газами и благодаря быстрому испарению влаги, разрушаются. Выходящие из печи газы имеют температуру 100–150° С.

Для питания сушильной печи над загрузочным концом барабана устраивается бункер для сырого концентрата, из которого материал дозируется в печь тарельчатым питателем. Подача концентратов в барабан производится через загрузочную чугунную трубу. Запыленные газы проходят через сухой пылеуловитель, затем отсасываются дымососом и перед выпуском в атмосферу пропускаются через мокрый пылеуловитель, представляющий собой циклон, который орошается водой. В нижней части циклона имеется отверстие для выпуска пульпы, которая остаивается и поступает в оборот на тарельчатый питатель для использования содержащегося в ней концентрата. Подсушенный концентрат с содержанием влаги от 5 до 6% разгружается из барабана через воронку. Производительность сушильных барабанов зависит от влажности и обычно составляет по концентрату 15–18 т/ч. Расход топлива составляет 1–2% от веса подсушенного концентрата. Качество сушки проверяют не только по содержанию влаги в подсушенном концентрате, но и по количеству комков в сухом концентрате. Для этого ежемесячно производят ситовый анализ.

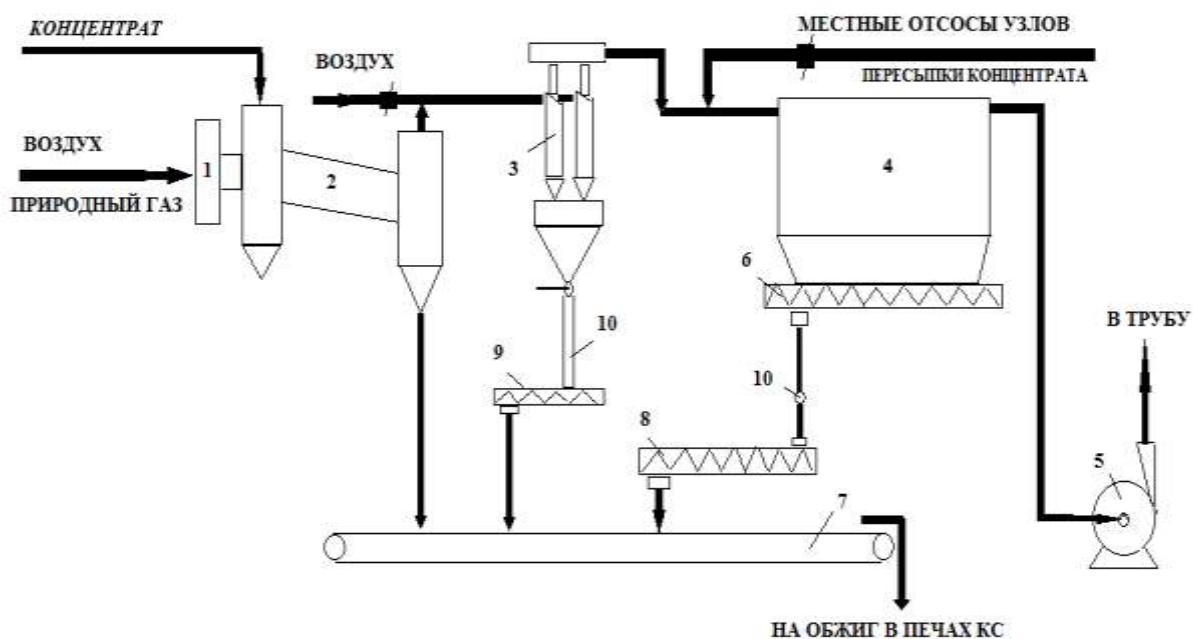
От каждой печи выделяется около 20–30 тыс.м<sup>3</sup> в час газов, содержащих пыли 20–40 г/м<sup>3</sup> и SO<sub>2</sub> не более 1–2%. Отходящие газы подвергаются очистке только от пыли, которая возвращается в технологический процесс.

В настоящее время вместо сушильных барабанов для обезвоживания концентрата широко применяются пресс-фильтра. Фильтр-пресс представляет собой технологический камерный аппарат циклического действия, предназначенный для разделения суспензий различных концентраций на жидкую и твердую фазу. Автоматический фильтр-пресс отвечает многим нуждам – от извлечения или удаления растворимых веществ посредством промывки кека, до максимального осушения кека, и достижения максимально возможной его однородности посредством фильтрации под давлением. Преимущество фильтр-пресса заключается не только в фильтрации. В результате высоких показателей высушивания нет необходимости применять также оборудование для термального осушения[1].

## 1.2 Аппаратурно – технологическая схема очистки отходящих газов сушильных барабанов

Аппаратурно–технологическая схема очистки отходящих газов сушильных барабанов представлена [2] на рис.2.

В ней в качестве в первой ступени обычно используется групповые циклоны, в которых улавливается около 70% пыли. Однако для более эффективного улавливания ставится сухой электрофильтр.



**Рисунок 2 - Схема очистки газов, печей сушки цинковых концентратов**

1- топка; 2–сушильный барабан; 3–групповой циклон; сухой электрофильтр;  
5 – дымосос; 6,8,9, - шнеки; 7–ленточный конвейер; 10–шлюзовая камера.

Подсушенный цинковый концентрат поступает на обжиг в печи кипящего слоя. Отделение приёма сырья и подготовки шихты состоит из 13 отсеков, в том числе 12 отсеков предназначены для складирования и шихтовки цинковых концентратов (ёмкость 12–ти отсеков 15000 м<sup>3</sup>), площадки для оттаивания контейнеров, эстакады с ж.д. путем, дробильного отделения и установки для мойки контейнеров.

Все перемещения грузов и материалов производятся четырьмя мостовыми кранами (5 т): из них три грейферных и один крюковой, оборудованный траверсой для погрузо-разгрузочных работ с контейнерами. Шихта готовится согласно заданию технолога цеха в одном из отсеков, из него загружается в бункер (2) дробильного отделения, оттуда ленточным транспортером (3) подается в дисковую дробилку (4), далее на один из двух (5) ленточных транспортеров, установленных на наклонной галерее между складом концентрата и обжиговым отделением.

Шихта готовится из имеющихся в наличии концентратов. Концентраты складываются в отсеки по наименованиям (поставщикам). Состав шихты должен отвечать следующим требованиям: в массовых долях, %, цинка 40 – 54, сера – 28–34, свинец – не более 2, медь – не более 3, мышьяк – не более 0,05, сурьма – не более 0,03, оксид кремния не более 3,0.

Крупность шихты после дисковой дробилки не более 10 мм и влага не менее 8%.

В печном отделении установлено следующее оборудование:

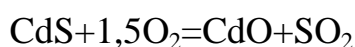
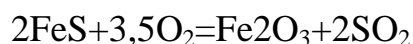
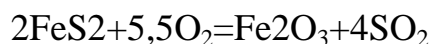
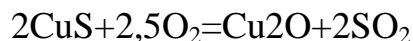
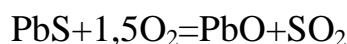
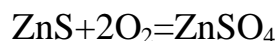
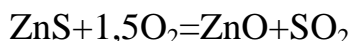
- а) печи кипящего слоя с водоохлаждающими сводами и котлами – утилизаторами;
- б) система транспорта продуктов обжига;
- в) циклоны;
- г) эксгаустеры (дымососы);
- д) газоходы.

Шихта с наклонного транспортера поступает на транспортер (6), с которого с помощью плужковых сбрасывателей загружается в бункера (7) (объем-40 т). Из бункеров шихта подается в печи (9) ленточными питателями (8) в количестве, регулируемом в соответствии с заданной температурой обжига, проводимой на воздушном дутье.

Обжиговые газы после утилизации тепла и частичного улавливания пыли в котлах утилизаторах (11) по двум газоходам диаметром 800 мм (для каждой печи) поступают в циклоны СИОТ-12 (21) для грубой очистки от пыли, далее газы поступают через коллектор грязного газа на тонкую очистку в сухие электрофильтры ГК-30 (30), откуда обеспыленный газ через коллектор чистого газа (32) поступает в сернокислотный цех. Отсос газов из печей производится эксгаустерами Э-4 (26) по два на каждую печь. При пуске (остановке) обжиговых комплексов до подключения (отключения) в систему, газы через обводной газоход сбрасываются в атмосферу через санитарную трубу высотой 120 м.

Обожженный концентрат (огарок) через порог высотой 1200:1300 мм непрерывно выгружается из печи в аэроохлаодильник (АВХ) (10), где охлаждается до температуры 200–250° С и вместе с пылью, уловленной в котлах – утилизаторах, поступает на скребковые конвейера КПС-650 (13), затем элеваторами (14) через скребковый конвейер с перфорированным днищем (15) (отверстия 10 мм), служащим грохотом, в приемные бункера (17) над пневмонасосами (20), которыми откачиваются по трубам в цех выщелачивания. Огарок фракцией более 10 мм, скребковым конвейером с перфорированным днищем (15) подается в шаровую мельницу (18) для размола, оттуда шнеком (19) возвращается в элеваторы (14). Пыль электрофильтров (ГК-30) и из коллектора грязного газа системой шнеков поступает в пневмонасос № 6 (29) и откачивается в цех выщелачивания.

При обжиге протекают следующие реакции окисления сульфидов:



Пыль и огарок направляют на переработку. Отходящие газы очищают от окислов серы и отправляют на производство серной кислоты. Расчет тепловых балансов определяют соотношение концентрат–воздух. Тепловым балансом также определяется расход охлаждающей воды в теплообменниках кипящего слоя для поддержания заданной температуры. Концентрация окислов серы в обжиговых газах обычно составляет 8–12 %.

Пыль содержит, 40–45% Zn; 1–2% Pb; 1–2% Cu; 0,3–0,7% Cd; около 10% S (из них половина в виде сульфатов). Средний размер частиц перед аппаратами тонкой очистки  $d_m = 3\text{мкм}$ . Удельное электрическое сопротивление слоя пыли при температуре газов 300 – 350° С и 10% -ной относительной влажности составляет  $10^8 - 10^9$  Ом см.

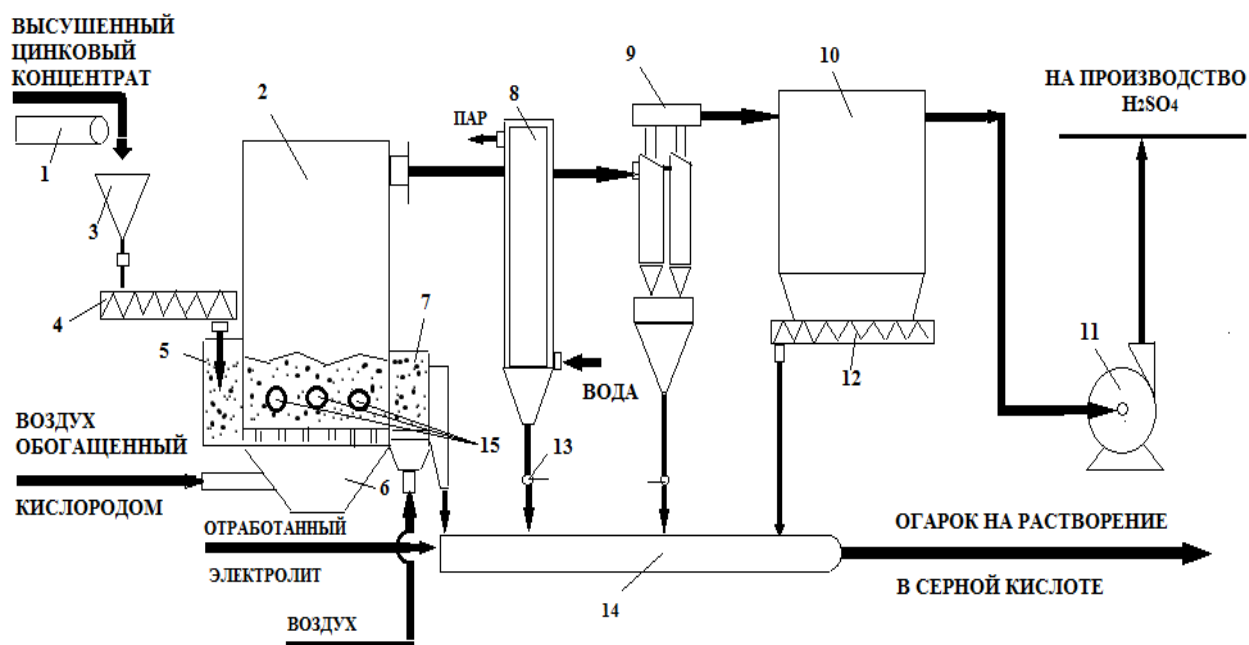
### **1.3 Аппаратурно – технологическая схема, очистки отходящих газов печей обжига цинковых концентратов**

Аппаратурно – технологическая схема, очистки отходящих газов печей обжига цинковых концентратов представлены [2, 4, 5]. На рис.3. представлена схема газоочистки от печи кипящего слоя, состоящая из котла-утилизатора, группового циклона грубого пылеулавливания и электрофильтра для тонкого пылеулавливания. В групповом циклоне концентрация пыли во входящих газах



достигает  $140\text{--}160 \text{ г/м}^3$ , на выходе  $8\text{--}10 \text{ г/м}^3$ . Пыль из циклонов выгружают при помощи герметизирующих устройств.

Примером такого устройства может служить широко распространенный в промышленности короткий шнек (4–6 витков) с затвором из выгружаемой пыли. Коэффициент заполнения шнека (коэффициент производительности) при устойчивой работе составляет 0,2. В последних витках происходит накопление материала с подачей его в выгрузочную камеру. При этом происходит заполнение всего межвиткового пространства с образованием пылевой пробки [моног]. Запыленность газов после электрофильтров обычно не превышает  $0,1\text{--}0,2 \text{ г/м}^3$ . Все обжиговые газы печей КС на утилизацию в сернокислотный цех. При этом их очищают от пыли, селена, ртути и других примесей. Санитарно – защитная зона вокруг заводов, расположенных в черте города, не превышает 1 км



**Рисунок 3** - Схема очистки газов печи КС для обжига цинковых концентратов  
1–ленточный конвейер; 2–печи КС; 3–бункер промежуточный; 4–шнек; 5–загрузочная камера; 6 – форкамера; 7–камера охлаждения огарка; 8 – холодильник кессонированный для охлаждения газов; 9–циклоны; 10 - сухой электрофильтр; 11– дымосос; 12–шнек; 13–шлюзовой затвор; 14 – желоб смыва огарка; 15–трубы теплосъема.

Требуемые технико–экономические показатели очистки газов обжига цинковых концентратов, представлена на таблице – 1 в (Приложение А).

#### **1.4 Утилизация тепла отходящих газов**

Утилизация тепла (избыточного), образующегося в процессе обжига сульфидных концентратов, производится котлами–утилизаторами, из кипящего слоя водоохлаждающими сводами и змеевиками. Котлы – утилизаторы установлены за печами «КС» № 1, 2,3,4.

Котел–утилизатор кипящего слоя (УККС-6) (11) – паропроизво – дительность по 6 т/ч, рабочее давление пара –  $40 \text{ кгс/см}^2$ , «V» образного исполнения газового тракта, связан с печью коротким газоходом (лодочка). Газы с пылью проходят последовательно: первый (вниз), затем второй (вверх) газоходы котла–утилизатора и через газоходы диаметром 800 мм направляются в циклоны (СИОТ). Тепло пылегазовой смеси отбирается панелями и ширмами в количестве 11 шт. В первом газоходе – 4 ширм, во втором – 7. Образование двух газоходов в котле обеспечивается установкой двух распределительных ширм и одной оси поперечной выходу газа из печи в котел.

При прохождении пылегазовой смеси через котел пыль частично осаждается на поверхностях теплосъема, с них удаляется обстукиванием и термоволновой очисткой. Через люки котла пыль осыпается в охлажденный бункер котла. Из бункера пыль консольным шнеком непрерывно подается в скребковые транспортеры №1 и №2. Котлы-утилизаторы запитываются химочищенной водой, непрерывно подаваемой с ТЭЦ, в два деаэратора атмосферного типа. Из бака деаэраторов питательная вода поступает на всас одного из трех питательных насосов, который подает воду в барабан котлов-утилизаторов. Сепарация паровоздушной смеси происходит в барабанах. При этом пар поступает в главный паропровод от котлов-утилизаторов редуционно – охлаждающую установку, где давление пара регулируется до  $8 \text{ кгс/см}^2$ . Рабочее давление в барабане котлов-утилизаторов  $35 - 40 \text{ кгс/см}^2$ . Вода повторяет цикл: циркуляционный насос – нагревательные поверхности, барабан

– сепаратор, пар на производство. Качество котловой воды поддерживается продувкой нижних точек коллекторов испарительных элементов и подачей раствора тринатрийфосфата.

### **1.5 Отделение сухих электрофильтров**

Обжиговые газы после грубой очистки в котле-утилизаторе и циклонах направляются на тонкую очистку по коллектору грязного газа в сухие электрофильтры ГК-30, который состоит из трех фильтров и каждый из двух трехпольных секций. Пыль с осадительных электродов постоянно стряхивается встряхивающими механизмами в бункер, оттуда системой шнеков подается в пневмонасос №6 для откачки в цех выщелачивания. Очищенный газ подается по коллектору чистого газа в сернокислотный цех.

Температура газа: на входе в электрофильтр и нагрузка на полях в (Приложении Б).

### **1.6 Транспортировка продуктов обжига**

Огарок и пыль котлов и циклонов комплекса (31), пыль электрофильтров системой шнеков попадает в пневмонасос №6 для откачки в цех выщелачивания, пыль циклонов СИОТ, транспортируемая скребковыми транспортерами №3 и №4, по ходу скребкового транспортера с перфорированным днищем поступает в бункера над пневмонасосами №1 и №2, а огарок и пыль котлов в бункера над пневмонасосами №3,4,5. Огарок фракцией более 10 мм поступает в бункер над мельницей далее, после размола, шнеком подается обратно в элеватор.

Откачивание продуктов обжига в цех выщелачивания осуществляется пневмонасосами по трубопроводам. Пыль циклонов пневмонасосами №1 и №2, огарок и пыль котлов пневмонасосами № 3,4,5, пыль электрофильтров ГК-30 и коллектора грязного газа пневмонасосом №6.

Скребковые транспортеры, элеваторы оборудованы сантехнической вентиляцией с отсосом запыленного воздуха через рукавные фильтры СМЦ-

166А, пыль из фильтров системой шнеков направляется в бункера пневмонасосами. Воздух для транспортировки продуктов обжига подается с турбокомпрессорной станции через установки осушки воздуха. Надежность работы систем определяется процессами адгезии и аутогезии [6].

### **1.7 Контроль газоочистительных систем**

Контроль работы системы печь КС – газоочистка осуществляется по измерениям концентрации пыли и химическому содержанию компонентов.

Для расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий, расчета предельно допустимых выбросов и начисления платежей за загрязнение атмосферы используются данные по инвентаризации вредных выбросов, проводимых специализированными фирмами [7]. Ими же определяется эффективность работы газоочистных систем. Общая эффективность обеспыливания газов определяется путем замера расхода газа и концентраций пыли на входе и выходе из аппаратов, а также гидравлические сопротивления. При этом не проводится анализ работоспособности установки, поскольку нет информации о причинах отклонения параметров установки от проектных данных из-за отсутствия сведений об аутогезионных характеристиках пыли и ее поведение в аппарате. Существующие методы определения структурных характеристик дисперсных материалов позволяют проводить определение связности пылей в лабораторных условиях, но непригодны для производственных испытаний.

Современные методы измерения запыленности газов, представленные в ГОСТ Р 50820–95, четко оговаривают условия проведения замеров: наличие подобия распределения скоростей и полей концентраций и наличие стабилизационного вертикального участка, где происходит отбор. При этом должно выполняться требование отсутствия в потоке сгустков, жгутов пыли, которые пробоотборник не фиксирует. Для мелких частиц, следующих за газом, при концентрациях ниже  $1 \text{ г/м}^3$  можно допустить, что соблюдается подобие полей скоростей и концентраций. При более высоких концентрациях

происходит расслоение по плотности сгустков, облачков из частиц, точно также как происходит образование крупномасштабных вихрей из мелкомасштабных в турбулентном потоке. Для полидисперсного аэрозоля, кроме того, значительны инерционные эффекты для частиц, что способствует концентрированию частиц в сгустки. В пробоотборную трубку, установленную, в центре канала проходит менее 0,1 % потока и сгустки, которые концентрируются у поверхности канала, не попадают в приемное отверстие. В общем случае требуется определение полей скоростей и концентраций в выбранных сечениях. Обычно запыленность определяется отбором пробы газа и взвешиванием осажденных из нее частиц с отнесением ее массы к единице объема газа. Отборы проб ведутся после разгрузителя на входе и выходе пылеотделителя. Для определения дисперсности пыли применяются импакторы, а для массовой концентрации – аллонжи с фильтрами [8]. При этом требуется изокINETический отбор проб, который заключается в равенстве скоростей газа в потоке и приемном отверстии пробоотборника, что на практике не всегда реализуется. При отборе проб расходы газа находятся в диапазоне 0,05 – 1,0 м<sup>3</sup>/час, а диаметры приемных отверстий в пробоотборниках 2 – 8 мм. Для представительного взвешивания необходимо иметь привес фильтров или подложек после их запыления на порядок больше, чем привес от воздействия влаги на поры поверхности осаждения. Использование импакторов сопровождается необходимостью их тарирования для конкретных сред, а также определенными условностями относительно распределения частиц по фракциям. Общая концентрация частиц в потоке при идеальных условиях отбора их аллонжем и анализа может быть определена более точно, чем с использованием импактора, однако в реальных условиях существуют большие ошибки в определениях концентраций. Данные исследования показывают, что на точность измерения влияет параметр

$$\Psi = \frac{\rho_{\delta}}{\rho} \frac{\rho_{\delta}}{D} \frac{U_0}{18\nu} \quad \text{и параметр } U_0/U_S, \text{ где } \rho_{\delta}, \rho - \text{плотности частиц и газа; } \delta, D -$$

диаметры частиц и отверстия приема потока пробоотборника;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;  $U_0, U_S$  – скорости в потоке газа и приемном отверстии

наконечника пробоотборника. Обзор методов оценки ошибки измерения концентрации пыли с использованием пробоотборников представлен в [9].

Пусть  $C_0$  – концентрация частиц в газе,  $C_s$  – концентрация, измеренная пробоотборником, тогда  $\Delta C = C_s - C_0$  – ошибка измерения. При  $U_0 = 20$  м/с,  $\rho_s/\rho = 2000$ ,  $\nu = 1,5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с значения  $(\Delta C/C) 100\%$  представлены в таблице 2.

Возникающие ошибки обуславливаются переменным сопротивлением приемных фильтров. Ошибки уменьшаются, если отбор проводится трубками с большими диаметрами приемных наконечников и соответственно с большими отборами газа. Например, для частицы 70 мкм и  $U_s = 10$  м/с,  $D = 5$  мм,  $(\Delta C/C) 100\% = 37\%$ ; для наконечника с  $D = 40$  мм и  $U_s = 10$  м/с ошибка равна 7 %. Однако наиболее грубые погрешности измерения возникают, когда пылевой поток содержит частицы с большой дисперсией их размеров. В этом случае часть пыли может перемещаться в виде жгутов, дюн, облачков и не попадает в зону отбора, причем распределение концентраций по сечению неравномерно.

Таблица 2 – Значения ошибки измерения  $(\Delta C/C) 100\%$  в зависимости от скорости газа в приемном отверстии наконечника пробоотборника и размера частиц

$\delta^2 / D_x \cdot 1000_{мм}$	$U_s, \text{ м/с}$				
	2,5	5	10	20	30
10	600	257	86	0	-34
5	523	225	74	0	-28
1	260	110	37	0	-13
0,5	160	70	23	0	-8
0,25	90	40	17	0	-4
0,125	48	20	7	0	-1,8

Часто такая ситуация возникает в потоке при входе в пылеулавливающий аппарат. Поэтому для точной оценки эффективности работы пылеулавливающей

аппаратуры и оценки выбросов требуется проводить быстрые (практически мгновенные) измерения полей концентраций, что физически невозможно.

Согласно ГОСТ Р 50820 – 95 при невозможности соблюдения изокINETичности при отборе проб вводят поправку  $C_0 = C_s / \kappa$ , где  $\kappa = \frac{U_0}{U_s} - \frac{U_0 / U_s - 1}{4\psi + 1}$ ,  $\psi = \frac{\rho_\delta}{D} \frac{\delta^2}{18\mu}$ . При измерении скоростей потока при колебаниях с использованием пневматической трубки операторы определяют некоторое среднее значение скорости. Пробоотборник и аспиратор настраивают на значения этой скорости. Расход пыли связан с концентрацией соотношением  $G_n = F \overline{U_0} \overline{C_0}$ , где  $F, \overline{U_0}, \overline{C_0}$  – площадь, средняя по сечению скорость потока, средняя по сечению концентрация частиц. При импульсном поступлении пыли в систему, в интервалах времени, когда  $\overline{U_0} \approx 0$ , то и  $G_n \approx 0$ , однако по измерениям пробоотборная трубка с аспиратором зафиксировывает расход пыли  $G_s = F \overline{U_s} \overline{C_s}$ . Т. е. возникает погрешность определения расхода пыли из-за нестационарности потока, при чем эта погрешность не связана с инерционным параметром  $\psi$ . Использование трубки нулевого типа в области малых скоростей также не решает проблемы из-за больших ошибок при отборе проб [9].

Если отбор проб ведется в горизонтальном канале, возникают дополнительные погрешности из-за перераспределения концентраций частиц за счет воздействия сил тяжести. В предположении, что частицы не влияют на движение других частиц и на движение несущего потока, уравнение переноса частиц с учетом турбулентного движения можно записать  $\varepsilon \frac{dc}{dy} = -\Delta V_y c$ , где  $\varepsilon$  – коэффициент турбулентного переноса (турбулентной вязкости),  $y$  – координата от дна горизонтального прямоугольного канала, направленная вертикально вверх,  $\Delta V_y$  – скорость частицы относительно газа под действием силы тяжести.

Кроме того, должно соблюдаться балансовое соотношение для масс частиц определенной фракции  $\int_{y=0}^h C dy = \overline{C} h$ , где  $h$  – высота канала. Решение

последнего уравнения совместно с уравнением переноса дает следующий

$$\text{результат: } C(y) = \frac{\bar{C} h \Delta V_y / \varepsilon}{1 - \exp(-\Delta V_y h / \varepsilon)} \exp(-\Delta V_y y / \varepsilon).$$

Этот результат получен в предположении, что  $\varepsilon = \text{const}$ . Расчет показывает, что  $\varepsilon = V_* h \cdot 0,25$ , где  $V_* = \sqrt{\tau_w / \rho}$ ,  $\tau_w$  – напряжение трения на стенке,  $\rho$  – плотность газа. Для крупных частиц может оказаться, что  $\Delta V_y / (0,25 V_*) > 1$  и частицы концентрируются у дна канала.

Таким образом, использование существующего метода измерения концентрации в нестационарном потоке дает заниженное значение расхода пыли на входе в сепаратор и завышенное значение расхода пыли на выходе, что приводит к неправильной оценке эффективности пылеулавливающей установки. Этот вывод подтверждают данные [7].

Для объективной оценки расхода пыли в канале необходимо, чтобы количество отбираемого воздуха с пылью было сопоставимо с расходом потока в канале. В системах обеспыливания поток пыли на входе в сепаратор точнее можно определить из балансового уравнения, по которому этот поток равен сумме количества уловленной пыли, деленному на время отсчета, и потока пыли на выходе из сепаратора. При этом оценку эффективности пылеулавливающей установки необходимо вести по уравнению:  $\eta = 100 \cdot \left( 1 - \frac{\Delta G_{yH}}{\Delta G_{yH} + \Delta G_{yЛ}} \right)$ , где  $\Delta G_{yH}, \Delta G_{yЛ}$  – масса пыли на выходе из установки и уловленной за время испытания.

В существующих руководствах рекомендации по применению инерционных аппаратов сводятся к сопоставлению фракционных эффективностей, гидравлических сопротивлений, которые определяются экспериментально. На батарейные и групповые циклонные газоочистители переносятся данные, характерные для одиночных аппаратов. При этом не учитывается неоднозначность свойств дисперсной фазы: изменение гранулометрического состава за счет агломерации, изменение адгезионных и аутогезионных связей за счет изменения термодинамических параметров



потока, фракционирование частиц и перераспределение концентраций частиц по элементам газоочистителя. В производственных условиях в газоочистителях формируются отложения пыли, возникают перетоки газа между элементами, ухудшаются условия транспортировки жгутов в приемник и формирования насыпного слоя.

Общий коэффициент обеспыливания газа в инерционном аппарате с учетом вывода пыли в выносные пылеуловители определяется формулами

$$\eta = \frac{M_{ул}}{M_{вх}} 100 = \frac{M_{вх} - \sum M_{вых}}{M_{вх}} 100 = \frac{M_{ул}}{M_{ул} + \sum M_{вых}} 100 = \frac{C_{вх} Q_{вх} - \sum C_{вых} Q_{вых}}{C_{вх} Q_{вх}} 100\%,$$

где  $M_{ул}$ ,  $M_{вх}$ ,  $M_{вых}$ ,  $C_{вх}$ ,  $C_{вых}$ ,  $Q_{вх}$ ,  $Q_{вых}$  – массы, концентрации частиц, расходы

газов. Фракционный коэффициент очистки  $\varepsilon_i = \frac{G_{iул}}{G_{iвх}} = \frac{\Phi_{iул}}{\Phi_{iвх}}$ , где  $G_i$ ,  $\Phi_i$  – вес и

процентное содержание фракции в уловленной и поступающей пыли.

Для точной оценки эффективности работы пылеулавливающей аппаратуры и оценки выбросов требуется проводить практически мгновенные измерения полей концентраций, что при современных методах и средствах физически невозможно. Как правило, при испытаниях оценивается общая эффективность газоочистного оборудования, которая, однако, не в полной мере характеризует его работоспособность. Например, при малой нагрузке котла на входе в осадитель в газе содержатся частицы менее 20 мкм, общая эффективность при этом будет составлять 30%, а их концентрация в выбросах окажется ниже допустимой. И наоборот, при повышенной нагрузке котла общая эффективность может достигать 95%, а концентрация золы в выбросах выше допустимой. Поэтому эффективность работы оборудования может быть объективно оценена с помощью фракционных коэффициентов очистки. Однако при испытаниях может возникнуть ситуация, при которой процесс обеспыливания происходит с одновременным образованием отложений. При этом в этом промежутке времени, концентрация пыли в уходящих газах оказывается намного ниже ожидаемой, а эффективность приближается к 100%.

Однако в дальнейшем, процесс обеспыливания нарушается и эффективность может снизиться до нуля. Поэтому существующие методы определения выбросов и эффективности обеспыливающего оборудования требуют дальнейшего совершенствования.

Были предложены более точные методы и средства оценки выбросов пыли и фракционной степени очистки газоочистительной аппаратуры [7].

- При определении уноса используются пробоотборники с наконечниками в 100 большими по площади по сравнению с существующими. При этом используется естественный перепад давления тягодутьевых устройств, и объем выделенной пыли достаточен для проведения фракционного анализа. Отбор проб ведется с расходом 30–80 м<sup>3</sup>/ч с приемными отверстиями наконечников 20–40 мм. В качестве осадителя применяется циклон с регулируемым расходом и набором элементов для пыли с различной слипаемостью и дисперсностью. Респирабельно опасная пыль (2–15мкм) улавливается циклоном полностью, остальная – фильтром [7].

- При отборе проб пыли на входе, в качестве пылеосаждающего устройства в пробоотборнике применяется разборный циклон, в котором происходит отложение пыли. При этом принимается скорость на входе, при которой выдерживаются равенства центростремительных ускорений в рабочем циклоне и пробоотборном. Например, циклоны 100 и 800 мм будут иметь скорости  $(20^2/8)^{0.5}=7\text{ м/с}$ , т.е. в циклоне 100 мм скорость должна быть приблизительно в 3 раза меньше, чем в циклоне 800 мм. При наличии отложений их извлекают, определяют плотность. Затем отложения растирают, пропускают через сито с ячейкой 1мм, определяют уплотняемость и фиксируют нагрузку, при которой плотность оказалась равной плотности пыли в отложении. По кривой уплотняемости судят об агрегированности пыли в потоке и возможности образований отложений в рабочем циклоне.

- Определяется вес выделенной из потока примеси за время измерений, т.е. определяется масса пыли в приемниках накопителях, или масса пыли, отбираемой из рециркуляционных линий. При этом используются пакеты с

гибкими оболочками и вставленными в них жесткими емкостями, которые присоединяются к пылевыводным каналам с необходимой герметизацией.

- Проводятся анализы содержания частиц в отобранных пробах из потока на выходе из газоочистной аппаратуры и выделенной из потока самой пылеулавливающей установкой (ситовой рассев, седиментация или микроскопический анализ).

- Возможно использование косвенных методов измерения запыленности потока для быстрого определения поля относительных концентраций в выбросах с последующим уточнением истинной концентрации. Преимуществом этих методов является автоматическая регистрация концентраций частиц (фотоэлектрический, лазерный, электроиндукционный и др. методы), однако требуются тарировки этих регистраций. Например, использование ИКП с коронноионизирующей зарядкой частиц и индукционной камерой регистрации позволяет проводить запись концентраций в зависимости от размещения трубки в сечении газотока, определение среднего значения концентраций и координаты положения трубки, соответствующей этому значению.

## **2 Технологическая схема цинкового производства**

Технологическая схема цинкового производства представлена на рисунке – 4 в (Приложении В)

Схема цепи аппаратов обжигового цеха ЦЗ представлена на рисунке – 5 в (Приложении Г)

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА обжигового цеха

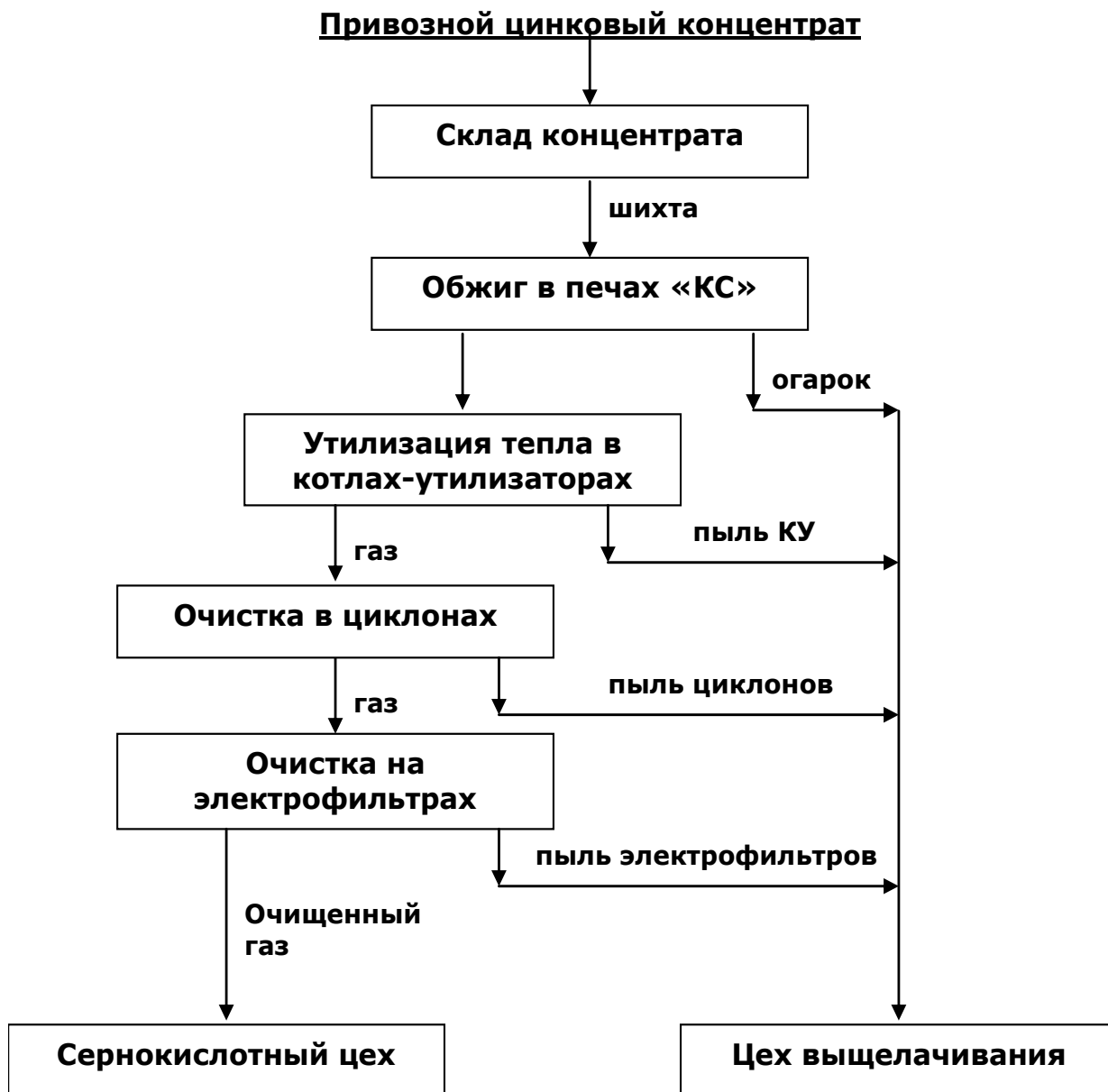


Рисунок 6 - Схема обжигового цеха

### 3 Сравнительная характеристика газоочистительной аппаратуры

#### 3.1 Физико-химические свойства пыли

На эффективность пылеуловителей значительно влияют физико-химические свойства улавливаемой пыли [6, 7]. Степень очистки газа зависит также от дисперсного состава и плотности частиц пыли. При оценке подвижности насыпного тела определяющее значение имеют величины сдвиговых напряжений [7]. По закону Кулона предельное сопротивление сыпучего материала сдвигу  $\tau$  пропорционально нормальному давлению на плоскость скольжения  $\sigma_n$ . Нормальное давление определяется внешней нагрузкой или массой частиц.

##### *Идеальный и связный дисперсный материал*

Частицы, между которыми проходит плоскость скольжения при сдвиге, испытывают еще и взаимное притяжение под действием сил аутогезии. Эта сила численно равна прочности на разрыв  $T$ . При нулевом значении нормального давления, в плоскости скольжения продолжает действовать сжимающее напряжение, численно равное прочности на разрыв  $T$ . Это напряжение, в отсутствие нормального давления, создает сопротивление сдвигу, называемом сцеплением  $C$ . Закон Кулона для связных материалов имеет вид  $\tau = C + \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_T$ , где  $\operatorname{tg} \varphi_T = f$  – коэффициент внутреннего трения,  $\varphi_T$  – угол внутреннего трения для сыпучего,  $C = T \operatorname{tg} \varphi_T$ . Однако для тонкодисперсных материалов применимо другое выражение  $(\tau/C)^n = (\sigma_n/T) + 1$ , где  $n$  – индекс сдвига  $n = 1 \div 2$ . Последнее уравнение позволяет упростить процедуру сдвиговых испытаний.

Во многих руководствах, по расчету аккумулялирующих и транспортирующих устройств, для насыпных грузов безоговорочно принимается, что коэффициент внутреннего трения равен тангенсу угла естественного откоса. Это характерно для идеальной сыпучей среды. Для связных насыпных грузов угол внутреннего трения меньше угла

естественного откоса. Угол естественного откоса определяется несколькими способами: способом насыпания, при котором откос образуется скользящими частицами; способ обрушения, при котором откос (обрушения) образуется в толще груза при внезапном открытии нижнего отверстия и его высыпании с образованием угла естественного откоса в засыпке; постепенным подъемом и удалением воронки с материалом от плоскости соприкосновения. В последнем варианте образуется конус из высыпающегося материала, причем скорость поступления материала в засыпку регулируют скоростью подъема воронки. Для связных материалов вводят понятия коэффициента сопротивления сдвигу, угла сопротивления сдвигу

$$f_{\sigma} = (\tau/\sigma) = \operatorname{tg} \varphi_{\sigma} = f + (C/\sigma_n),$$

При возрастании  $\sigma_n, f_{\sigma} \rightarrow f$ .

Любой полидисперсный материал можно рассматривать как монодисперсный, включающий более крупные частицы. За исходную монодисперсную структуру принимается достаточно узкая фракция самых мелких частиц. Крупные частицы рассматриваются как включения в исходную структуру. Число контактов в сечении разрыва и прочность реального сыпучего тела можно найти, рассчитав число контактов и прочность для исходной монодисперсной структуры [7]. Задача определения прочности полидисперсной структуры сводится к выбору исходной местной структуры с размером частиц  $d_n$ , плотности упаковки  $\varphi_n$  и прочности индивидуальных контактов  $F_1$ . Если содержание мелких частиц  $a$ , а общая степень заполнения объема полидисперсного материала  $\varphi$ , то объем мелких частиц  $a\varphi$ , крупных частиц  $(1-a)\varphi$ , объем структуры, в котором размещены только мелкие частицы  $1 - (1-a)\varphi$ , а степень заполнения исходной структуры

$$\varphi_n = a\varphi / [1 - (1-a)\varphi].$$

Прочность сыпучего материала определяется по формуле

$$T = abK \left\langle \frac{1}{2} \cdot \frac{\bar{S}_q}{\bar{V}_q} \cdot \frac{\rho}{\rho_q} \right\rangle f \left[ H_0 - \frac{\bar{d}}{3} \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) \right],$$

здесь  $a$  – коэффициент с линейной размерностью, отражающий распределение частиц в объеме,  $b$  – коэффициент пропорциональности между площадью контакта частицы и ее общей поверхностью,  $K$  – координационное число, определяющее число контактов, приходящееся на каждую частицу,  $\bar{d}, \bar{S}_q, \bar{V}_q$  – средние эффективные диаметр, площадь поверхности, объем частицы, определенные с учетом распределения частиц по размерам,  $H_0, \rho_0$  – предельное расстояние между частицами и плотность сыпучего материала, при которой прочность стремится к нулю.

Прочность монодисперсного сыпучего зависит от прочности индивидуальных контактов частиц  $F$ , координационного числа  $K$ , пористости  $\Pi$ , а также размера исходных частиц  $d$  [7]. Для большинства монодисперсных материалов  $K\Pi = 3,1 \approx \pi$  и

$$T = \Pi \cdot \frac{F}{d^2} / \Pi.$$

Таким образом, можно провести оценку возможного предельного состояния пылевого слоя.

Зависимость прочности контактов от силы поджима  $N_1$  можно представить в виде  $F_1 = B N_1^p$ , где  $B$  и  $p$  – опытные коэффициенты [6]. Увеличение аутогезионного взаимодействия в отдельных контактах затрудняет переупаковку частиц при уплотнении слоя и тем самым сдерживает число контактов. В результате прочность всей структуры может не только не увеличиться, но и даже уменьшиться. Реально прочность слоя в отложении определяется аутогезионными свойствами и условиями его формирования. Существующие приборы для измерения прочности уплотненных образцов применимы только в лабораторных условиях. Для оценки слипаемости пыли проводят уплотнение пыли под нагрузкой 50 КПа.

При меньших нагрузках на прочность слоя влияет степень агрегированности, а более высокие не характерны для пылеулавливания [6].

В условиях длительного хранения на воздухе порошкообразные и особенно гигроскопические материалы проявляют склонность к слеживаемости, вызывающей изменение сыпучести и прочности таких материалов. В [7] приведены сведения об исследованиях структурно – механических свойств порошка нитрата аммония при относительной влажности воздуха 30–90%. При переходе от 30% к 40% прочность образцов увеличилась в несколько раз. При переходе от 30% к 50% прочность увеличилась на порядок при хранении порошка в течении 24 часов. Поэтому в пылеулавливающих системах при скоплении пыли в бункерах–накопителях часто возникают затруднения с выгрузкой пыли в транспортные средства.

#### *Адгезия частиц*

При адгезии важное значение приобретает скорость в процессе контакта частиц с поверхностью, при которой происходит их адгезия [6]. Основными факторами, влияющими на удержание частиц, являются размеры и скорость частиц, а также упругие свойства материалов контактирующих тел. Для оценки адгезии исследуют зависимости числа частиц, осевших на поверхности образцов, от их скорости при обтекании поверхности аэрозолем, содержащим частицы определенных размеров. Различают первую и вторую критические скорости минимального осаждения частиц. При скорости потока, меньшей первой критической, происходит упругая деформация зоны контакта, которая восстанавливается после отрыва частиц. Для мелких частиц силы веса, лобовые силы в пограничном слое ничтожно малы по сравнению с силами адгезии и условие отрыва можно записать в виде  $F_{\text{упр}} > F_{\text{адг}}$ .  $F_{\text{упр}} = K_{\text{упр}} \cdot r^2 \cdot v^{6/5}$ .  $K_{\text{упр}}$  – константа, зависящая от упругих свойств материала;  $r$ ,  $v$  – радиус и скорость частиц соответственно. Сила адгезии определяется природой сил ее обуславливающую [7].



## Агрегация частиц

В сгустках объемная концентрация увеличивается в десятки и сотни тысяч раз по сравнению с исходной. В жгутах присутствуют частицы различных размеров. В [7] приведены сведения о результатах исследования, в которых показано, что в присутствии частиц менее 10 мкм возможна активная агломерация частиц за счет молекулярных сил. Вводится понятие критического размера частиц из условия соизмеримости сил сцепления между ними в структурной сетке и их весом, если рассматривается агломерация в поле сил тяжести. Граница между грубодисперсными и микрогетерогенными системами определяется характерным размером частиц  $\delta_c$ , при котором вес частицы уравнивается силами сцепления между ними. Если полагать, что сцепление определяется атомными контактами, то  $mg = \sum F_c$ , где суммирование ведется по всем контактам,  $F_c$  – сила сцепления в контакте,  $m$  – масса частицы. Если полагать, что площадь единичного точечного контакта соизмерима с площадью кристаллической решетки ( $S_c \approx 10^{-19} \text{ м}^2$ ), можно считать, что прочность контакта соизмерима с прочностью межатомных связей  $P_c \approx 10^{10} \div 10^{11} \text{ Па}$ . Контакты между частицами реализуются, как правило, по микровыступам, площадь которых соизмерима с площадью кристаллической решетки. В качестве характеристики склонности дисперсных систем к самопроизвольному агрегированию вводится величина  $\chi = \frac{\overline{F_c}}{mg}$ , при этом объемная концентрация частиц должна быть достаточной для возникновения структуры. Величину  $\chi$  определяют в зависимости от расстояния  $H$  между частицами: контакт атомный, если расстояние  $H \approx 5 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ; контакт коагуляционный, если расстояние соответствует их фиксации в положении «ближнего» минимума потенциальной энергии взаимодействия  $H \approx 10^{-8} \text{ м}$ ; контакт коагуляционный при фиксации частиц в положении дальней потенциальной ямы  $H \approx 10^{-7}$ . В каждом конкретном случае прочность элементарных контактов между

частицами и соответственно прочность возникающих из них структур зависит от физических свойств и химической природы поверхности твердой фазы, состава и свойств дисперсионной среды и соответственно зависит критический размер частиц. В [6] приведены результаты исследования по влиянию адсорбированных газовых пленок на поверхности частиц на механические характеристики порошковых материалов. Агрегаты, поступающие в пылеуловитель с потоком газа, имеют различную природу образования и соответственно прочностные характеристики. *При срыве отложений с поверхностей технологического оборудования* в поток поступают более уплотненные агломераты пыли. Отложения на технологическом оборудовании [6] разделяют по следующим признакам: месту возникновения, химическому составу и структуре. По месту возникновения отложения разделяют на натрубные, настенные (стенки топки), дымоходные, подовые. По химическому составу разделяют отложения алюмосиликатные, щелочносвязные, сульфитные, фосфатные, которые обладают клеящими свойствами. По структуре сформированный слой можно классифицировать как сыпучий (золовой) и плотный (спекшийся и сцементированный). Например, отложения на поверхностях котельного агрегата при сжигании воркутинского угля состоят из 3-х слоев: из липкого слоя толщиной менее 0,5 мм, содержащих частицы менее 1 мкм, второй промежуточный - рыхлый состоит из частиц со средним размером 1,5 мкм толщиной 0,2–0,3 мм, третий – слой из спекшихся частиц толщиной 1–3 мм. Плотным отложениям сопутствуют сыпучие и наоборот. При обтекании труб со скоростью 8–11 м/с на фронтальной и кормовой частях образуются рыхлые отложения; при скорости обтекания более 11 м/с на фронтальной части образуются плотные отложения, в кормовой – рыхлые. Количество осевшей золы зависит от скорости потока и концентрации частиц. Скорости потока, при которых происходит отрыв частиц, определяются распределением сил адгезии и размеров частиц. Количественно отрыв прилипших частиц определяется медианной скоростью отрыва [6]. В реальных процессах, в

производственных условиях все элементы энергетических агрегатов подвержены вибрационным нагрузкам. Отложения подвергаются воздействию крупных частиц. Происходит периодический срыв отложений с поверхностей и их пополнение. Таким образом, в потоке на входе в золоуловитель присутствуют не только исходные золотые частицы, но и агрегаты из частиц, причем с переменной их концентрацией.

В аспирационных системах при транспортировке пыли частицы размером 2–5 мкм увлекаются мелкомасштабными высокочастотными пульсациями и подвержены турбулентной миграции к ограждающей поверхности. По мере их накопления частиц на поверхности происходит их срыв за счет различных возмущений помимо потока: вибрации стенок оборудования при внешних воздействиях на них сил акустической или другой природы, воздействия крупных частиц, разрушающих связи между частицами. Оторвавшиеся от поверхности под воздействием потока агломераты частиц имеют отличные от исходных частиц адгезионные и аутогезионные свойства.

В системах аспирации термодинамические параметры потоков не постоянны. Особенно это проявляется в средах с изменяющейся влажностью.

Тела обладают поверхностной свободной энергией. При взаимодействии с водяными парами, содержащимися в воздухе, свободная поверхностная энергия уменьшается за счет работы смачивания. Поверхностная удельная свободная энергия жидкости есть поверхностное натяжение.

Поверхность раздела представляет слой, соизмеримый по величине с межмолекулярным расстоянием в объеме жидкости. В этом слое молекулы непрерывно переходят в паровую фазу и обратно в жидкость (конденсация и парообразование). Таким образом, поверхность раздела представляет турбулизированный слой, в котором в полной мере проявляются межмолекулярные взаимодействия. Поэтому поверхностное натяжение зависит от температуры насыщенного пара или от его давления.

Термодинамическое состояние определяется поверхностными свойствами частиц, содержанием влаги в газовой фазе, температурных градиентов. Расчет состояния ведется из условия термодинамического равновесия слоя.

В насыпном состоянии частицы связаны между собой контактными взаимодействиями (аутогезионными силами), которые определяют подвижность частиц. Во взвешенном состоянии эти силы меньше гидродинамических сил, разъединяющих частицы. Аутогезионные силы смоченных частиц оказываются больше гидродинамических за счет большой поверхности взаимодействия.

В процессе агломерирования материалов [6] в наибольшей мере проявляется присутствие адсорбционно –и капиллярно-связанной воды. При соприкосновении паров воды с гидрофильной поверхностью частицы происходит ее гидратация, т. е. адсорбция молекул воды. Наиболее прочно связанная вода имеет толщину  $\sim 5 \cdot 10^{-6}$  мм. Адсорбированная вода отличается по свойствам от обычной: ее плотность в 1,5–2 раза выше обычной, вязкость также выше, теплоемкость и способность растворять твердые вещества ниже обычной.

Влажность, при которой все частички сыпучего материала покрыты слоем адсорбированной воды максимальной толщины, называют максимальной молекулярной влагоемкостью (ММВ).

Если поверхности соседних частичек разделены пленкой воды толщиной менее  $10^{-5}$  мм, то такая вода находится в адсорбированном состоянии и взаимодействие называют молекулярным. Величина ММВ связана с удельной поверхностью и отражает энергетическое состояние агломерируемого материала.

Капиллярная вода по физическим свойствам относится к обычной свободной воде. Вода в капиллярном состоянии обладает отрицательным давлением, в результате которого и возникают стягивающие капиллярные силы.

В зависимости от количества влаги в сыпучем материале возможны разновидности капиллярного состояния воды. Влажность, при которой все капилляры пористого (сыпучего) тела заполнены водой, называется максимальной капиллярной влагоемкостью (МКВ). МКВ связана с распределением частиц по размерам и является структурным параметром [7]. Методы определения ММВ, МКВ приведены в [7].

Таким образом, агломераты из мелких частиц, в зависимости от условий их образования, могут иметь различную прочность и размеры при транспортировке их несущей средой в пылеуловитель.

### *Отложения*

В двухфазных потоках происходят процессы образования и распада структур дисперсной среды. В закрученных потоках, которые формируются в вихревых камерах различного назначения, структурирование, диспергация дисперсной фазы определяют устойчивость и эффективность технологических процессов. Следует различать первичные и вторичные структуры дисперсной фазы. Первичные – это структуры из частиц, вводимые вместе с потоком в камеру для формирования вихря. Вторичные – это структуры образующиеся в самой камере, в основном в результате приграничных эффектов вблизи криволинейных поверхностей, формирующих вихревое течение газа. В пылевой технике стабильная работа газоочистной аппаратуры осуществляется, если отложение на поверхностях не образуются, а напряжения в дисперсном материале в насыпном состоянии оказываются предельными.

### *Пылеобразование при струйном движении гетерогенного потока*

Движение материала в самотечных коробах, пересыпках осуществляется в виде блоков, сгустков и отдельных частиц [10].

Таким образом, материал, при пересыпках движется в виде струи или сгустками. Однако диспергация происходит и некоторая часть дисперсного

материала в воздухе находится в виде индивидуальных мелких частиц. Пыление в узлах пересыпки зависит от степени диспергируемости дисперсных материалов. Методы определения диспергируемости порошковых материалов приведены в [10].

Интенсивными неорганизованными источниками пылеобразования являются пересыпки материала, погрузка материала в открытые вагоны, сыпка материала открытой струей в склад и так далее. Объемы пылевыведений от всех этих источников могут быть рассчитаны по формуле [10]:

$$M_{\text{гр}} = K_1 \cdot K_2 \cdot G_{\text{ч}} \cdot 10^6 / 3600, \text{ г/с}$$

где  $K_1$  – весовая доля пылевой фракции в материале (таблица 2). Определяется путем отмывки и просева средней пробы с выделением фракции пыли размером от 0 до 200 мкм;  $K_2$  – доля пыли (от всей весовой пыли), переходящая в аэрозоль (таблица 3). Проверка фактического дисперсного состава пыли и уточнение значения  $K_2$  производится отбором проб запыленного воздуха на границах пылящего объекта (склада, хвостохранилища) при скорости ветра 2 м/с, дующего в направлении точки отбора пробы.  $B$  – коэффициент, учитывающий высоту пересыпки, принимается по данным таблицы Руководства, приведенными в [10];  $G_{\text{ч}}$  – суммарное количество перерабатываемого материала в час, т/час. Определяется главным технологом предприятия.

Таблица 3 – Значение коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$  для определения выбросов пыли (фрагмент)

п/п	Наименование материала	Плотность материала, г/см <sup>3</sup>	Весовая доля пылевой фракции $K_1$ в материале	Доля пыли, переходящая в аэрозоль,
1	Огарки	3,9	0,04	0,03
2	Клинкер	3,2	0,01	0,003
3	Цемент	3,1	0,04	0,03
4	Известняк карьерный	2,7	0,03	0,01

Продолжение таблицы – 3

п/п	Наименование материала	Плотность материала, г/см <sup>3</sup>	Весовая доля пылевой фракции $K_1$ в материале	Доля пыли, переходящая в аэрозоль, $K_2$
5	Известняк дробленый	2,7	0,04	0,02
6	Мергель карьерный	2,7	0,03	0,01
7	Мергель дробленый	2,7	0,05	0,02
8	Известь комовая	2,7	0,04	0,02
9	Известь молотая	2,7	0,07	0,05
10	Гранит карьерный	2,8	0,01	0,003
11	Гранит дробленый	2,8	0,02	0,04
32	Графит	2,2–2,7	0,03	0,04
33	Уголь	1,3	0,03	0,02
34	Зола	2,5	0,06	0,04
35	Диатомит	2,3	0,03	0,02
36	Перлит карьерный	2,4	0,04	0,01
37	Перлит готовая	2,4	0,04	0,06

*Влажность* частиц влияет на их адгезионные и аутогезионные свойства. Повышение влажности пыли часто объясняется ее гигроскопичностью, то есть способностью поглощать влагу из воздуха. Если для сухого способа очистки гигроскопичность пыли является отрицательным фактором (происходит налипание пыли в аппарате), то при мокром способе очистки, наоборот, в последнем случае необходимо учитывать свойство слипаемости частиц.

*Слипаемость* пыли, особенно тонкодисперсной, повышается с увеличением влажности, что обусловлено силами межмолекулярного взаимодействия соприкасающихся пылинок. Молекулы на границе пылинки с воздухом имеют свободную энергию, что обуславливает силы поверхностного натяжения.

По степени слипаемости пыль можно разделить на четыре группы:

1. Неслипающаяся (шлаковая, доломитовая пыль, кварцевая пыль, сухая пыль);

2. Слабослипающаяся (сланцевая зола, коксовая пыль, слипающаяся зола, апатитовая пыль, доменная пыль);

3. Среднеслипающаяся (торфяная зола, металлическая пыль, колчеданы, сухой цемент, сажа);

4. Сильнослипающаяся (цементная пыль; любая пыль с максимальным размером частиц 10 мкм);

Слипаемость пыли, в значительной мере определяет эксплуатационную надежность работы пневмотранспорта, пылеуловителей, в частности полное или частичное забивание аппаратов осажденной пылью.

*Электрические свойства пыли:* удельное электрическое сопротивление определяется при прохождении через слой пыли электрического тока. Оно существенно влияет на работу пневмотранспорта, пылеуловителей, электрофильтров и сильно зависит от температуры и влажности пыли [10].

Электрическая заряженность частиц пыли зависит от ее химического состава, способа ее получения.

Решающими факторами, объясняющими явления электризации частиц пыли в естественных условиях, следует считать силы трения и адсорбцию ионов поверхностью самих частиц.

Электрические свойства пыли используют для их коагуляции при осаждении в поле силы тяжести и центробежных сил, в электрофильтрах, а также при магнитных методах очистки.

### **3.2 Центробежные пылеуловители**

Наибольшей пылезадерживающей способностью обладают циклоны конического и цилиндрико-конического типов. Основными геометрическими соотношениями, влияющими на эффективность и гидравлическое сопротивление, являются отношения площади входного патрубка к плановой площади циклона, отношение площади входного патрубка к площади газовыводного патрубка, отношение площади пылевыводного отверстия к площади выходного патрубка, угол конусности циклона [7].



Движение потока в циклонных камерах связано с возвратными течениями из объемов вне камер. Конические циклоны обладают большей устойчивостью потоков, однако в присутствии твердой фазы возникают колебания давлений и пульсации потоков из-за воздействия образующихся жгутов на вращение потока. Механизм возникновения противоточного движения в циклонном аппарате может быть объяснен эжекционными явлениями, которые возникают вследствие взаимодействия вращающихся потоков, проходящих из камеры в газоотводный центральный канал, с центральными потоками в форме вынужденного вихря с квазитвердым распределением тангенциальных скоростей в поле массовых сил и условиях турбулентного переноса. Центробежные силы заставляют часть газа из центральной области перемещаться к периферии, давая приток порциям газа в аксиальном направлении из приемника пыли, а также из объема вне циклона, куда истекает газ. Возникающий при этом радиальный перепад давлений побуждает газ с периферии перетекать через пылевыводное отверстие в приемник.

В циклонах с тангенциальным или улиточным вводом запыленного газа вблизи верхней крышки формируются тороидальные вихри, в которых аккумулируется пыль, периодически, по мере накопления, выпадающая в сепарационный объем. Это приводит к нестационарности течения аэрозоля и процессов жгутообразования в пристенной области сепарационного объема.

В одиночных циклонных пылеуловителях с индивидуальным приемником пыли нестационарность концентрации пыли хотя и влияет на эффективность сепарации, однако течение аэрозоля в целом проходит устойчиво и обеспыливание газов осуществляется удовлетворительно. Известны конструкции с устройством отсечного канала – байпаса для перекачивания пыли из-под верхней крышки в коническую часть циклона (циклон Ван – Тонгерена) [11].

При батарейной компоновке циклонных элементов, когда камеры ввода газов, вывода газов и сбора пыли являются общими для параллельно

установленных циклонных элементов, очистка газа осуществляется значительно хуже из-за возникающих перетоков газа, вторичной диспергации жгутов пыли в приемнике – общей камере сбора пыли, а также, вероятно, из-за перетоков газа между циклонными элементами в камере очищенного газа. Поскольку часть энергии потока, проходящего через каждый элемент, затрачивается на работу эжектирования газа из камер вне циклона, возможной оказывается ситуация, когда даже для незапыленного потока, через элементы будет циркулировать некоторая часть газа из-за незначительных дефектов изготовления, монтажа, различной длины газывыводных патрубков очищенного газа, взаимодействия вихрей и ограждающих поверхностей камер вывода газа и сбора пыли, а также пространственного расположения элементов по отношению к каналу ввода газа в сепаратор. Видимо этим обстоятельством объясняется тот факт, что коэффициент гидравлического сопротивления группового или батарейного циклонного сепаратора на 15–20% больше, по сравнению с тем же количеством циклонных элементов с индивидуальными приемниками пыли.

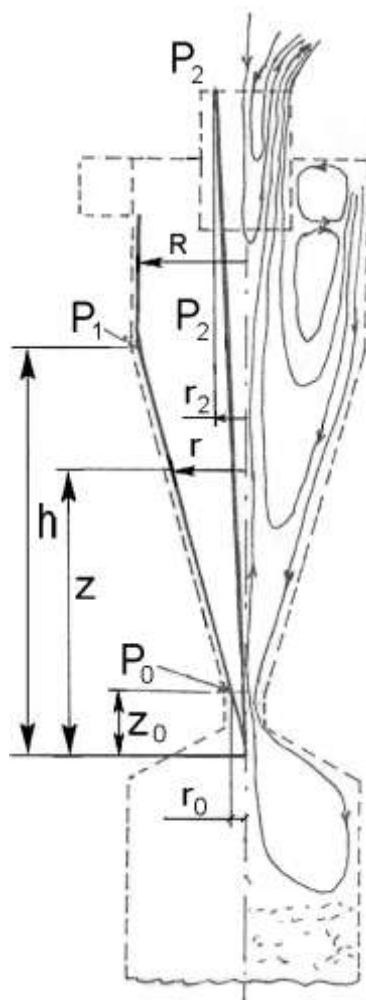
В связи с этим возникает вопрос об устойчивости потоков в циклонах при воздействии различных возмущений в виде колебаний концентрации, дисперсности пыли, нестационарности несущей среды и т.д.

О характеристиках потоков в циклонах с различной геометрией можно получить представление, если воспользоваться данными [11], где имеются распределения полей скоростей потока в объемах конического и цилиндрического циклонов. В [11] приведены также характерные линии тока течения в циклонах.

С увеличением концентрации частиц уровень тангенциальных скоростей снижается. Это особенно характерно для конической части циклона [7]. Это обстоятельство приводит к изменению перепада давлений по высоте циклона (в основном по высоте конической части) в зависимости от изменения концентрации частиц во входящем в циклон потоке.

Проведем более подробный анализ влияния концентрации на распределение давления по высоте циклона. Теоретическое решение задачи распределения давления в объеме циклона на основе механики дисперсных сред в настоящее время получить невозможно, однако, можно получить качественные оценки распределения давления, если считать известной гипотетическую линию тока вблизи пристенной зоны, там, где радиальные градиенты скоростей имеют малые значения.

На рис. 7 представлена схема высокоэффективного конического сепаратора с индивидуальным приемником пыли. В правой части изображены линии тока течения газа, в левой части представлены расчетные и исходные величины, относящиеся к выделенной гипотетической линии тока газа в конусе.



**Рисунок 7** – Схема линий тока газа в противоточном коническом циклоне

Если градиенты скоростей и давлений малы, радиальные распределения давлений в каждом сечении циклона определяются выражением

$$\frac{dP}{dr} = c \frac{V^2}{r};$$

Уравнение выделенной гипотетической линии тока, в случае осесимметричного течения, запишется в виде:

$$\frac{dz}{w} = \frac{dr}{u}; \quad r - r_0 = \int_{z_0}^z \frac{u}{w} dz;$$

В приведенных выражениях приняты следующие обозначения:  $P$ ,  $V$ ,  $u$ ,  $w$  – давление, окружная скорость, радиальная и аксиальная скорости на линии тока;  $c$  – плотность газа;  $r$ ,  $z$  – координаты линии тока.

Если положить, что отношение  $u/w = \text{const}$ , то  $r = \frac{u}{w} z$ , поскольку  $r_0 = \frac{u}{w} z_0$  (рис. 1). Тогда выражение (1) можно записать для выделенной линии тока как

$$\frac{dP}{dz} = c \frac{V^2}{z};$$

Поскольку  $\frac{V_i}{V_R} = \left( \frac{R}{r_i} \right)^{n_R}$ , то для выделенной линии тока

$$\frac{V}{V_R} = \left( \frac{h}{z} \right)^n, \quad (*)$$

Как следует из [11] для конического циклона (рис.7)  $n_R$  меняется в диапазоне 0,47 – 0,35. Примем среднее значение  $n_R = 0,41$ .

В верхней части циклона характер распределения окружных скоростей с изменением концентрации не меняется, хотя уровень этих скоростей несколько снижается при высоких концентрациях [11]. В нижней части циклона, особенно вблизи пылевыводного отверстия, значение окружных скоростей снижается. Таким образом, показатель  $n$  в формуле (\*) зависит от концентрации частиц в потоке и может быть аппроксимирован выражением

$n = n_0(1 - \alpha_n c^{\beta_n})$ , где  $n_0$  – показатель степени в уравнении (\*) при  $c=0$ , где  $c$  – концентрация частиц в потоке на входе в циклон, кг пыли/кг воздуха,  $\alpha_n$ ,  $\beta_n$  – коэффициент и показатель степени, значения которых зависят от типа циклона, физико-химических свойств и дисперсности пыли. Значение величины  $n$  для циклона приведенного на рис. 7 находится в диапазоне от – 1,00 до 0,41.

Приближенные значения величины  $n$  можно получить, измеряя перепад давления между потоками во входном патрубке и приемнике пыли, используя выражение (\*).

Опыт показывает, что в приемнике пыли циклона СК-ЦН-34, который работает на незапыленным газе под напором, образуется разрежение, тогда как при концентрации цементной пыли на входе  $5 \text{ г/м}^3$  приемник пыли оказывается под напором. Приемники пыли групповых циклонных пылеотделителей НИИОГАЗ, работающих под напором, рекомендуют герметизировать для предотвращения присосов воздуха [7, 12].

Крупные частицы в области пылевыводного отверстия в большей мере подвержены тормозящему действию поверхности, труднее транспортируются потоком и при концентрации более  $10 \text{ г/м}^3$  накапливаются в объеме циклона из-за неудовлетворительного оттока частиц в приемник. В этом случае вынужденный вихрь формируется не в приемнике, а в сепарационной зоне в объеме циклона на вращающемся слое из частиц. Это приводит к повышенному уносу крупных частиц из сепаратора [7, 12].

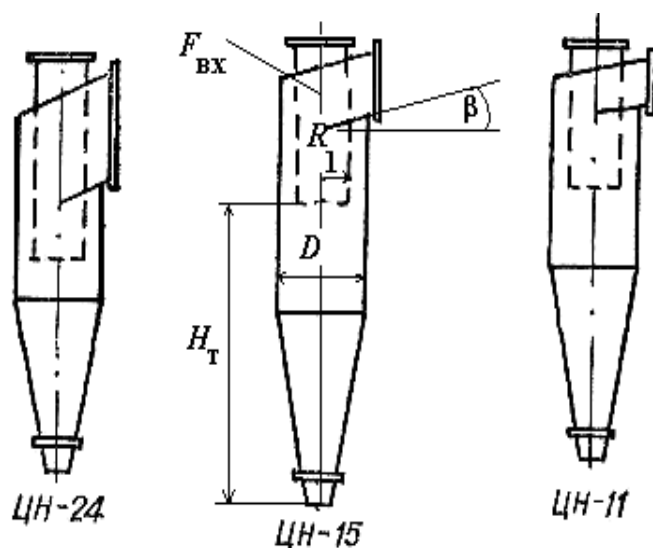
В реальных системах газоочистки мгновенная концентрация частиц колеблется в широких пределах. Это связано со срывом отложений в газоходах и входных коллекторах батарейных газоочистителей, а также потому, что движение примеси в пневмотранспортных системах и системах переработки дисперсных материалов осуществляется в виде сгустков и жгутов. В конических и цилиндро-конических циклонах в области пылевых отверстий происходит усиление нестационарного воздействия частиц на

поток в сотни раз. Это является причиной того, что начало формирования вынужденного вихря периодически перемещается из камеры сбора пыли в объем циклона. В батарейных сепараторах это является одной из причин снижения эффективности обеспыливания потока и нарушения процесса сепарации.

Таким образом, применение высокоэффективных элементов в групповой или батарейной компоновке приводит к неустойчивости их совместной работы. Применение элементов с лопаточными закручивателями ведет к неустойчивости работы и снижению эффективности сепарации в большей мере, чем применение элементов, содержащих закручиватели с тангенциальным вводом. Таким образом, для устойчивой и эффективной работы батарейных сепараторов необходимы технические решения, в которых элементы были бы аэродинамически не связаны друг с другом. Этого можно достичь, используя индивидуальную транспортировку уловленных частиц в камеру сбора пыли для каждого отдельного элемента батареи.

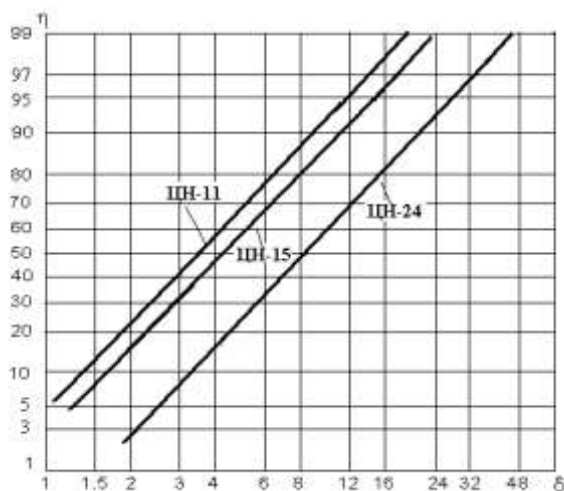
### 3.3 Оценки эффективности циклонов

Наиболее широкое применение нашли циклоны серии ЦН. У этих циклонов один и тот же относительный радиус выхлопного патрубка (рис.8).



**Рисунок 8 - Схемы циклонов серии ЦН**

На рис. 9 в вероятностно–логарифмической сетке приведена зависимость фракционной эффективности обеспыливания газов от размера частиц [8].



**Рисунок 9 - Фракционная эффективность циклонов ЦН**

Этот метод построен на удачной обработке и аппроксимации экспериментальных данных испытания циклонов нормальной функцией распределения обобщенного параметра  $x$ . Однако физическую интерпретацию этому параметру дать затруднительно и его невозможно использовать при исследовании новых циклонов [8].

В циклонных, вихревых камерах газ закручивается на периферии и выходит в центральной части через канал с меньшим радиусом. Основной характеристикой потока является величина окружной скорости  $W_{\phi m}$ , радиус  $R_m$ , на котором окружная скорость равна скорости  $W_{\phi m}$ . Если положить, что на поверхности с радиусом  $R_1$   $W_{r1}$  и  $W_{\phi 1}$  постоянны, то параметр крутки,  $S_v = W_{\phi 1} / W_{cp1}$  [13], где  $W_{\phi 1}$  – окружная скорость газа на радиусе  $R_1$ ,  $W_{cp1}$  – среднерасходная скорость газа в выхлопном патрубке. При потенциальном распределении  $W_{\phi}$  по радиусу  $W_{\phi 1} = W_{\phi k} R_k / R_1$  и  $S_v = 1 / m_a$ ,  $m_a = F_{вх} / \pi R_1 R_k = \bar{f}_{вх} / r_1$  – конструктивный параметр крутки [13], здесь  $r_1 = R_1 / R_k$ ,

$R_k=D/2$ . При  $0,2 < m_a < 2,2$  наиболее удовлетворительное совпадение с экспериментом дает соотношения  $r_{ml} = R_m / R_l = 0,35 / \sqrt{m_a}$ , приведенное в [13].

Обобщенный параметр  $\alpha = \Delta U / (\varepsilon / R_k)$  представляет отношение скорости частиц относительно газа под действием центробежных сил к скорости перераспределения частиц турбулентным переносом. Таким образом,

$$\eta = \eta\left(\frac{\Delta U_* R_k}{\varepsilon}\right) = \eta\left(\frac{\Delta U_*}{W_{ц}} \cdot \frac{W_{ц} R_k}{\varepsilon}\right) = \eta(\alpha)$$

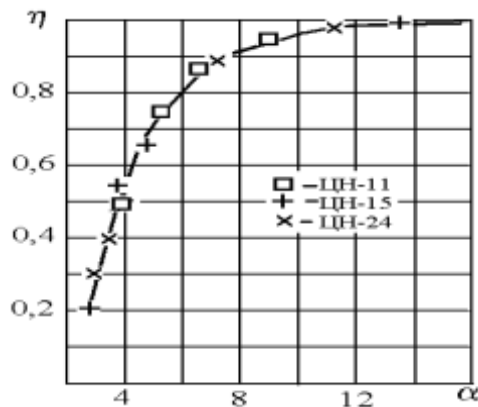
Здесь  $\Delta U_* = \frac{2p}{\rho R_k^2} \frac{1}{H_T} \int_0^{H_T R_k} \int_0^{R_k} \Delta U R dR dZ$  – среднеинтегральная по сепарационному

объему скорость частиц относительно газа,  $W_{ц} = Q / \pi R_k^2$  – среднерасходная плановая скорость,  $Q$  – расход газа через циклон. Для циклонов с одинаковым относительным радиусом выхлопного патрубка можно принять

$$\Delta U_* = \frac{2}{R_k^2} \int_0^{R_k} \Delta U R dR$$

$$\eta = \eta(\alpha) = \eta \left[ \frac{\delta^{1,25} \cdot W_{ц}^{0,5}}{18^{0,75} \cdot \nu^{0,5} \cdot R_k^{0,75}} \left( \frac{\rho_{\delta}}{\rho} \right)^{0,75} \left( \frac{\xi \cos \beta}{f_{ex}} \right)^{1,5} \cdot r_*^{-(1,5n+0,75)} \cdot 4 \bar{H}_T (n+1) \right].$$

На рис.10 представлена кривая зависимости фракционного обеспыливания газа от показателя  $\alpha$ . При этом использовались данные по фракционной эффективности обеспыливания газов, представленной в [8] (рис.10).



**Рисунок 10** - Зависимость фракционной эффективности обеспыливания газов от показателя  $\alpha$ .



Видно, что кривая эффективности одна и та же для разных циклонов, если их данные представлены в зависимости от показателя  $\alpha$ . [13]

### 3.4 Электрофилтры

Электрофилтр – пылеуловитель, в котором улавливание частиц пыли или жидкости осуществляется с помощью электрических сил. Частицы пыли получают (как правило) отрицательный электрический зарядов поле коронного разряда и движутся под действием электрического поля к заземленным электродам, оседают на них и после регенерации электродов собираются в бункерах [8, 9]. Небольшая часть пыли, примерно 0,5–1% от общего количества, приобретает положительный заряд и осаждается на коронирующих электродах и также периодически удаляется. Для создания электрического поля в электрофилтрах применяются повысительно-выпрямительные агрегаты напряжением 80 кВ и выше с системами регулирования, обеспечивающими требуемый режим питания [8, 9, 14].

Недостатки электрофилтров:

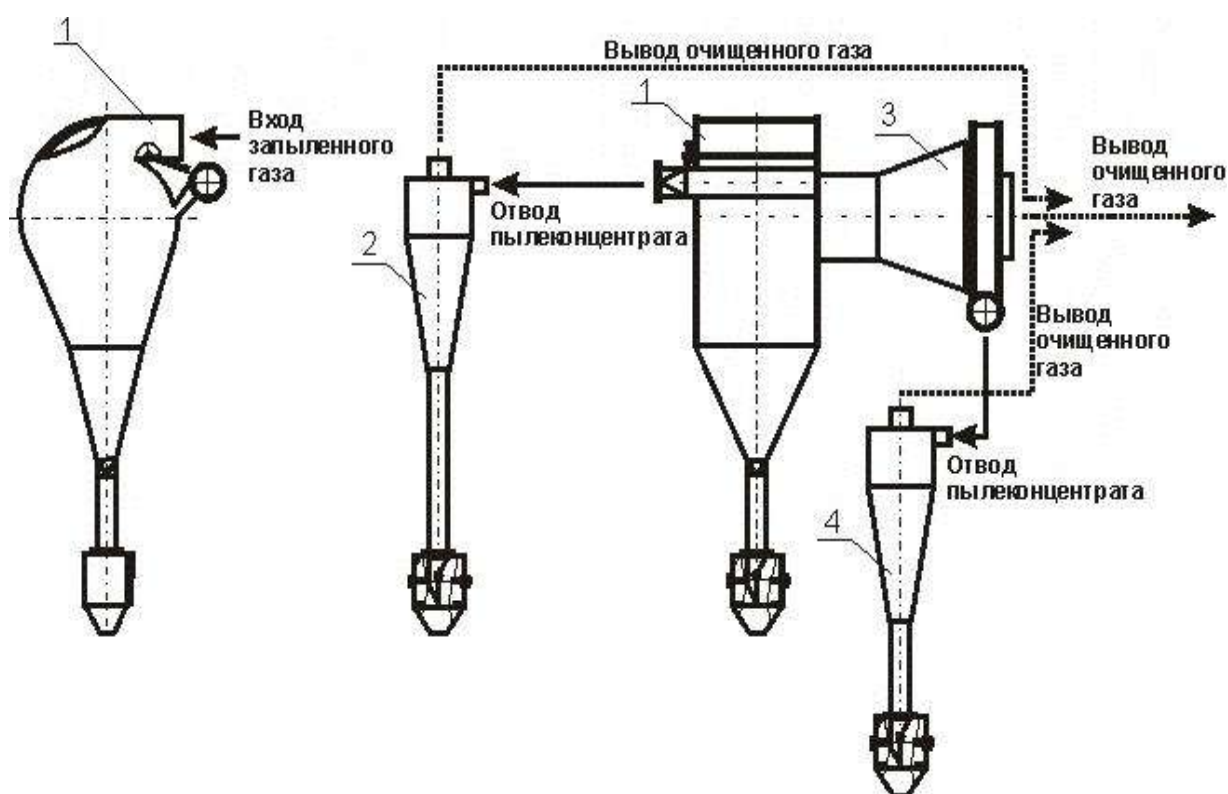
- Потеря утойчивости процесса сепарции при отклонении от заданного технологического режима и присутствии механических дефектов внутреннего оборудования, [8, 9, 14]
- Поломка осадительных электродов в условиях высоких температур и усталостных явлений при ударных встряхиваниях;
- Неудовлетворительное использование объема аппарата и большая материалоемкость системы электродов;
- Необходимость тщательного выполнения газораспределительных устройств [14, 15]
- Забивание решеток пылью;
- Изменение аутогезионных свойств пыли при встряхивании электродов и осадения пыли;
- Необходимость контроля филтров и регистрации параметров;

- Необходимость уплотнений для устранения перетоков газов и подсосов;
- Неудовлетворительная работа систем пылеудаления в условиях изменяющихся свойств подвижности слоя пыли;
- Необходимость работы при высоких температурах для предотвращения конденсации паров окислов серы [1–5]
- Необходимость тепловой изоляции;
- Большой объем ремонтных работ при отклонении от штатных режимов работы.

#### 4 Реконструкция промышленной установки

Циклонные групповые аппараты работают при высоких пылевых нагрузках и значительных колебаниях давления и расхода газа и пыли [7, 14]

Комплексы пыле- и золоулавливания (КПЗУ) предназначены для очистки дымовых газов котлов различной производительности, воздуха аспирационных сетей от твердых примесей загрязняющих веществ при переменных режимах работы, не стационарности потоков [16, 17, 18, 19, 20]. КПЗУ представляет собой трехступенчатую систему очистки, включающую в себя: разгрузитель – пылеконцентратор, диффузорный пылеконцентратор, выносные циклоны [16, 17].



**Рисунок 11** - Принципиальная схема комплекса пыле- и золоулавливания (КПЗУ)

1 – разгрузитель–пылеконцентратор, 2 – выносной циклон разгрузителя-пылеконцентратора, 3 – конический пылеконцентратор, 4 – выносной циклон конического пылеконцентратора.

Первая ступень пылеуловителя, представляет собой разгрузитель-пылеконцентратор (1). Часть пыли из разгрузителя–пылеконцентратора с газом отводится в выносной циклон по типу ЦН-11 или СК-ЦН-34М (2), представляющий собой вторую ступень очистки. Затем дымовые газы из разгрузителя – пылеконцентратора поступают в третью ступень очистки, представленную коническим пылеконцентратором (3), также снабженным выносным циклоном по типу ЦН-11 или СК-ЦН-34М (4). Очищенные газы поступают в общий раскручиватель дымовых газов или сразу же в дымосос. Уловленные в пылеуловителе частицы поступают в стандартный гидрозатвор.

#### **4.1 Расчет промышленной системы газоочистки**

Температура, °С:

перед циклоном 550–600

перед электрофильтром 300–350

Расход воздуха на печь, тыс. м<sup>3</sup>/ч 12–17

Давление воздуха, кПа 15–25

Разрежение под сводом, Па 10–20

Производительность печи, т/сут 125–160

Удельная производительность, т/(м<sup>2</sup>·сут) 4,5–5,0

Выход, %:

огарка 60–65

пыли из циклона 35–40

пыли из электрофильтров 2–5

Запыленность газов, г/м<sup>3</sup>:

перед циклоном 150–200

после циклона 8–16

за электрофильтром 0,05–0,15

*Пылевывос при обжиге в печах КС.* При обжиге концентратов в печах КС обычно выход пыли составляет 35–40% от массы обжигаемого материала

[1–5]. Технологически важно снижать пылеунос из печи КС в пылегазовый тракт, так как это облегчает теплоотъем от газовой фазы и пылеулавливание, что обеспечивает длительную компанию котлов-утилизаторов при эффективной их работе.

Если температура в слое обжигаемого материала повышается, то выход пыли уменьшается из-за укрупнения материала. При повышенной дисперсности концентрата (когда концентрат получен обогащением тонко вкрапленных руд) выход пыли увеличивается.

Таблица 4 – Техничко-экономические показатели очистки газов обжига цинковых концентратов

Пылевынос из печей кипящего слоя, концентрата	До 20%
Количество газов на выходе из печи, м <sup>3</sup> /т концентрата	20 тыс.м <sup>3</sup>
Подсосы атмосферного воздуха по системе газоочистки, %	Не более 5%
Средняя скорость газов в электрофильтре, м/с	1.0
Пылевынос после электрофильтров, кг/т концентрата	-
Производительность печей «КС» по концентрату т/сут	120–160

Расход дымовых газов  $(140/24)20000=116000 \text{ м}^3/\text{ч}$

В качестве системы сухой очистки отходящих дымовых газов от печи кипящего слоя принята система трехступенчатых инерционных аппаратов с выносными циклонами. Расход дымовых газов через каждый блок составляет  $120000 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

В качестве первой и второй ступеней сухой очистки каждого блока используется вихревой сепаратор–осадитель–концентратор пыли, снабженный направляющими и ограничивающими движение запыленного потока приспособлениями, регулирующей аппаратурой, собственным пылевым бункером, стояком для транспортировки уловленной пыли и затвором непрерывной выгрузки [16, 17, 12]. Во второй ступени сухой очистки используется выносной циклон сепаратора-осадителя (ЦН-11,

$d=1000$  мм), с собственным транзит-«приемником», отдельным стояком для транспортировки уловленной пыли, затвором непрерывной выгрузки и раскручивателем очищенных газов [16] .

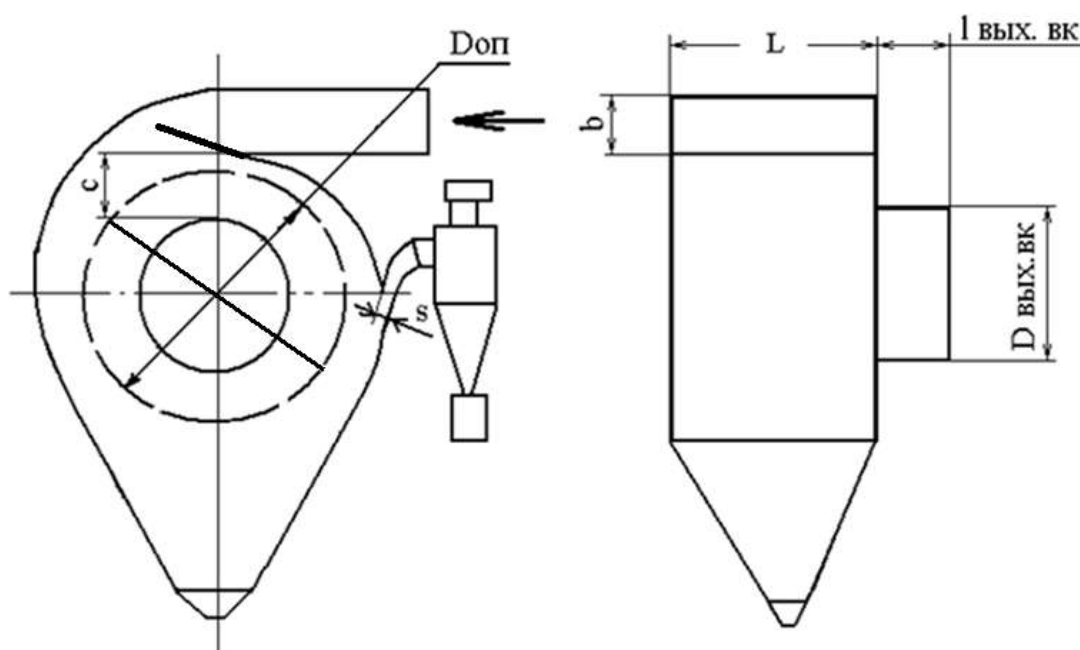
В качестве третьей ступени сухой очистки используется прямоточный пылеконцентратор, также снабженный выносным циклоном ЦН-11,  $d=1000$  мм с собственным транзит-«приемником», отдельным стояком для транспортировки уловленной пыли, затвором непрерывной выгрузки и раскручивателем очищенных газов [18, 16].

Пыль, уловленная во всех ступенях очистки, поступает в общий приемник пыли.

Расчету подлежат:

1. Вихревой сепаратор-осадитель,
2. Прямоточный пылеконцентратор,
3. Циклон ЦН-11,  $D_{\text{ц}}=1000$  мм, в количестве 2 шт.

1. Расчет вихревого сепаратора–осадителя -концентратора по данным [17, 18].



**Рисунок 12** - Вихревой сепаратор-осадитель с прямоточным пылеконцентратором

Для вихревой камеры скорость газа на входе по рекомендации [17] составляет  $w = 21\text{--}25$  м/сек, принимаем  $24,7$  м/с

Необходимая площадь прямоугольного входного сечения вихревой камеры  $a \times b$  составляет:

$$S_{\text{вх}} = \frac{Q_p}{\omega_{\text{вз}}} = \frac{33,3}{24,7} = 1,35 \text{ м}^2;$$

где  $Q_p$  – объемный расход запыленных дымовых газов,  $\text{м}^3/\text{с}$ :  
 $Q_p = 120000/3600 = 33,3 \text{ м}^3/\text{с}$ ;

Принимаем ширину прямоугольного входа вихревой камеры и ширину камеры  $L=2250$  мм, тогда высота прямоугольного входа  $b=600$  мм.

Для вихревой камеры скорость газа в опорном сечении по рекомендации [17] составляет  $\omega_{\text{оп}} = 4\text{--}5$  м/сек, принимаем  $4,7$

Необходимая площадь опорного сечения вихревой камеры  $S_{\text{оп}}$  составляет:

$$S_{\text{оп}} = \frac{Q_p}{\omega_{\text{оп}}} = \frac{33,3}{4,7} = 7,08 \text{ м}^2.$$

Тогда опорный диаметр вихревой камеры  $D_{\text{оп}}$  составляет:

$$D_{\text{оп}} = \sqrt{4S_{\text{оп}} / \pi} \approx 3,0 \text{ м}.$$

Для более устойчивой работы вихревой камеры и улучшения ее работы примем уровень отвода запыленных газов в выносные циклоны на уровне 10%.

Для вихревой камеры оптимальная скорость газа на выходе по рекомендации [17] составляет  $\omega_{\text{вых}} = 12,0$  м/сек.

Необходимая площадь выходного сечения вихревой камеры  $S_{\text{вых}}$  составляет:

$$S_{\text{вых.ВРК}} = \frac{Q_p}{\omega_{\text{вых}}} = \frac{33,3}{12,0} \approx 2,77 \text{ м}^2.$$

Тогда выходной диаметр вихревой камеры  $D_{\text{вых}}$  составляет:

$$D_{\text{вых.ВРК}} = \sqrt{4S_{\text{вых.ВРК}} / \pi} \approx 1,8 \text{ м}.$$

Из компоновочных условий принимаем длину выходного патрубка вихревой камеры  $l_{\text{ВЫХ ВК}}=1200\text{мм}$ .

Ширина поперечной щели  $S$  для отвода запыленных газов в выносной циклон составляет 20% от ширины входа.

Тогда  $S=0,20 \cdot 600 \text{ мм} = 120 \text{ мм}$ .

Гидравлическое сопротивление вихревой камеры  $\Delta P_{\text{ВПК}}$  определяем по формуле по рекомендации, приведенной в [17]:

$$\Delta P_{\text{ВПК}} = \bar{P} \cdot \rho \frac{\omega_{\text{ВЫХ}}^2}{2}, \text{ Па};$$

где:

$\bar{P}$  - безразмерная величина перепада давления в вихревой камере, берется по графику, приведенному в [17] в зависимости от параметра

$$n_K = \frac{\pi R l}{ab},$$

где:  $R=0,8$ - выходной радиус вихревой камеры, м,  $l=R+b/2+c$  – входное плечо вихревой камеры, м,  $c=0,275$ , расстояние между стенками подводящего и выходного каналов, м,  $l=0,9+0,6/2+0,275=1,475$  – входное плечо вихревой камеры, м,  $L, b$  – размеры входного сечения, м,

$$n_K = \frac{\pi R l}{L b} = \frac{3,14 \cdot 0,5 \cdot 1,475}{0,6 \cdot 2,25} = 3,15, \text{ при этом } \bar{P} = 15.$$

$\omega_{\text{ВЫХ}} = 12,0$  - скорость в выходном патрубке вихревой камеры, м/сек;  $\rho$  – плотность газового потока,  $\text{кг/м}^3$

$$\rho = \rho_0 \frac{273 \cdot (P_{\text{бар}} - P_p / 13,6)}{760 \cdot (273 + T_r)} = 1,293 \frac{273 \cdot (745 - 13,4 / 13,6)}{760 \cdot (273 + 180)} = 1,293 \cdot 0,6 = 0,75 \text{ кг/м}^3.$$

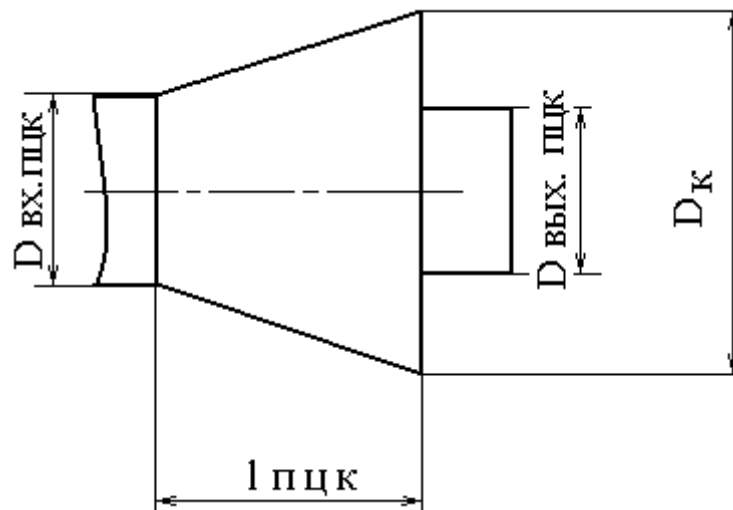
где  $\rho_0=1,293 \text{ кг/м}^3$  – плотность газовой среды при  $0^\circ\text{C}$  и  $760 \text{ мм.рт. ст.}$ ;

$P_{\text{бар}}=745 \text{ мм. рт. ст.}$  – барометрическое давление;  $P_p = 13,4 \text{ мм. рт. ст.}$  – разряжение на входе в пыле- золоулавливающую систему;  $T_r = 180^\circ\text{C}$  – температура запыленных дымовых газов на входе в вихревую камеру.

$$\Delta P_{\text{ВПК}} = \bar{P} \cdot \rho \frac{\omega_{\text{ВЫХ}}^2}{2} = 15 \cdot 0,75 \frac{12^2}{2} = 810 \text{ Па}.$$



## 2. Расчет размеров прямооточного пылеконцентратора.



**Рисунок 13** - Прямоточный пылеконцентратор

Для прямооточного концентратора начальный диаметр соответствует диаметру выходного патрубка вихревой камеры и составляет

$$D_{\text{вх.пцк}} = \sqrt{4S_{\text{вых.врк}} / \pi} \approx 1,8 \text{ м.}$$

Из компоновочных условий принимаем длину прямооточного концентратора  $l_{\text{пцк}} = 2000 \text{ мм.}$

Принимаем конечный диаметр прямооточного концентратора

$$D_{\text{к}} = 1,6D_{\text{вх}} = 2880 \text{ мм с диаметром выхода } D_{\text{вых.пцк}} = 0,5D_{\text{к}} = 1440 \text{ мм}$$

Гидравлическое сопротивление прямооточного концентратора  $\Delta P_{\text{пк}}$  определяем по формуле по рекомендации [8]:

$$\Delta P_{\text{пцк}} = \xi \frac{\rho \omega_{\text{вх}}^2}{2}, \text{ Па;}$$

где:

$\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления. По экспериментальным данным, его величина, отнесенная к сечению входного патрубка, составляет  $\xi = 17-18$ .

$$\Delta P_{\text{пцк}} = \xi \frac{\rho \omega_{\text{вх}}^2}{2} = 17 \frac{0,75 \cdot 12^2}{2} \approx 918 \text{ Па.}$$

### 3. Расчет циклона.

Для циклонов типа ЦН-11 плановую скорость газа принимаем

$$\omega = 4.3 \text{ м/сек.}$$

Необходимая площадь сечения циклонов  $F_{\text{ЦА}}$ , при условии, что через выносные циклоны проходит не более 10% от всего количества образующихся дымовых газов, составляет:

$$F_{\text{ЦА}} = \frac{Q_{\text{рц}}}{\omega} = \frac{33,1 \cdot 0.1}{4,3} = 0.78 \text{ м}^2,$$

где  $Q_{\text{рц}}$  - объемный расход газа,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Тогда диаметр циклона

$$D_{\text{ЦА}} = \sqrt{4F_{\text{ЦА}} / \pi} \approx 1 \text{ м.}$$

Отвод уловленного концентрата из вихревой камеры и прямоточного пылеконцентратора через выносной циклонный аппарат осуществляется за счет создаваемого между выхлопным и пылевыводным патрубками перепада давления. Установка специального вентилятора для отсоса пылевого концентрата через выносные циклоны не требуется. Расчетное гидравлическое сопротивление всех установок пыле- золоулавливающей системы сухой очистки отходящих дымовых газов от котлоагрегатов 2000 Па.

Примем медианное значение пыли  $\delta_{50} = 35 \text{ мкм}$ , дисперсию  $\sigma = 2.5$  [17]. Зная фракционную кривую обеспыливания и фракционное содержание частиц за печью можно найти общую эффективность.

Найдем фракционную эффективность сепарации пыли для каждой ступени. Фракционная эффективность сепарации пыли для вихревого сепаратора-осадителя определяется по формуле [18]

$$\eta_{i \text{ ВРК}} = 1 - \frac{\left\{ \left( 1 - \frac{R_l}{R_2} \right) - \eta_2 \left( \frac{R_l}{R_2} \right)^\alpha + \eta_2 \frac{R_l}{R_2} \frac{1}{\alpha - 1} \left[ 1 - \left( \frac{R_l}{R_2} \right)^{\alpha - 1} \right] \right\}}{\left[ \eta_2 \left( \frac{\alpha}{\eta_2 R_l} + 1 \right) + \left( \frac{R_l}{R_2} \right)^\alpha (1 - \eta_2) \right] \left( 1 - \frac{R_l}{R_2} \right)}$$

где  $R_1, R_2$  - радиусы выхода и корпуса;  $\eta_2 = 1$  - коэффициент отвода частиц из ядра на периферии потока;  $\vartheta_{*I} = \sqrt{V_{\phi I} V_{rI}}$  диффузионная скорость частиц на границе ядра потока,  $\alpha = A_K / \varepsilon$ ,

$$A_K = \frac{\tau V_{\phi 2}^2}{(1-2n)} \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^{2n} \frac{I}{(R_2/R_1 - 1)} \left[ \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^{1-2n} - 1 \right] - \text{силовая функция, } \tau = \frac{\rho_\delta}{\rho} \frac{\delta^2}{18\nu}$$

— время релаксации,  $\varepsilon = (0.01 + 0.56M) R_2 W_{\text{вх}} \alpha M$  — коэффициент турбулентного перемешивания частиц определяется по [18]. В [18] проведен расчет фракционной эффективности для следующих данных сепаратора:

$R_1 = 0,333(\text{м})$ ,  $R_2 = 0,666(\text{м})$ ,  $W_{\text{вх}} = 20(\text{м/с})$ ;  $\eta_2 = 0,3$   $\rho_\delta/\rho = 3330$ ;  $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5}(\text{м}^2/\text{с})$ .

Причем в этом сепараторе геометрические соотношения приблизительно соответствуют соотношениям промышленного аппарата. Поэтому расчет промышленного варианта сепаратора—разгрузителя проведем пересчетом кривой уноса, приведенной в [18], используя результаты теории подобия, согласно которой фракционные эффективности подобных аппаратов в зависимости от обобщенных параметров описываются одной кривой [12].

Величина  $\delta_{50}$  для конкретного циклона рассчитывается из условия, что в геометрически подобных ему циклонах эффективность определяется числом  $Stk$ ;  $\eta_\phi = \eta_\phi(Stk)$ ;  $Stk = 2\tau W_{\text{пл}}/D$ ;  $\tau = \rho_\delta \delta^2 / 18\mu$ , откуда

$$\delta_{50} = \delta_{50}^T (D/D_T \cdot \rho_{\delta T}/\rho_\delta \cdot \mu/\mu_T \cdot W_T/W)^{0,5},$$

где динамическая вязкость газа  $\mu_T = 22,2 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ; расходная плановая скорость  $W_T = 3,5 \text{ м/с}$ ; диаметр цилиндрической части циклона  $D_T = 0,6 \text{ м}$ ; плотность частиц  $\rho_{\delta T} = 1930 \text{ кг/м}^3$ . Величины  $\delta_{50}^T$ ,  $\lg \sigma_\eta$  определяются из таблицы 6.4 для конкретного типа циклона. Содержание частиц уменьшится в  $1/[1-\Phi(x)]$  раз.

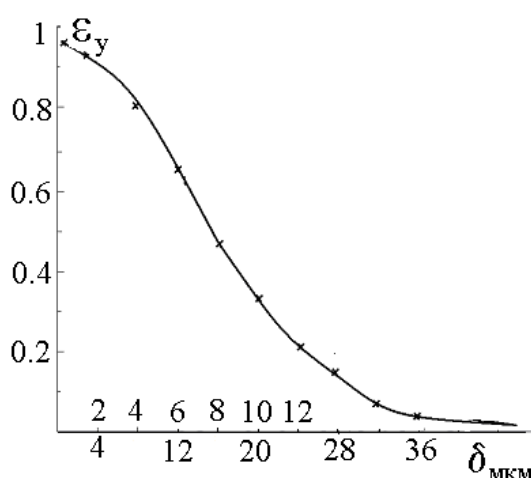
Эффективности одинаковы, если  $\left( \frac{\rho_\delta}{\rho} \frac{\delta^2}{18\nu_f} \frac{W_0}{R_c} \right)_{\text{мод}} \left( \frac{\rho_\delta}{\rho} \frac{\delta^2}{18\nu_f} \frac{W_0}{R_c} \right)_{\text{пром. образца}}$

Таким образом

$$\delta_{50} = \delta_{50}^M (D/D_M \cdot \rho_{\delta M}/\rho_\delta \cdot \mu/\mu_M \cdot W_M/W)^{0,5}.$$

Коэффициент кинематической вязкости дымовых газов  $\nu_f = 3.1 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ , отношение плотностей частицы и газа  $\rho_\delta/\rho = 3700$ , отношение опорных диаметров образца и модели  $3/2 \times 0.666 = 2.25$ . Таким образом, эффективности (уносы) одинаковы для частиц в модели и образце, которые находятся в зависимости  $\delta_{50\text{пром.обр.}} = \delta_{50}^M (2 \cdot 0,9 \cdot 2,25)^{0,5} = 2,01 \delta_{50}^M$ .

На рис.14 показана кривая уноса для сепаратора. Верхние значения диаметров частиц соответствуют уносу в модели, нижние – уносу в промышленном аппарате.



**Рисунок 14** - Фракционный унос пыли из вихревого пылеуловителя

Значения фракционной эффективности ( $\eta_i = 1 - \epsilon_y$ ) рассматриваемого вихревого сепаратора–осадителя представлен в таблице 5.

**Таблица 5** – Фракционная эффективность вихревого сепаратора-осадителя

Размер частиц, мкм	1	4	8	12	16	20	28	36	72
$\eta_{i \text{ ВК}}$	0,002	0,02	0,05	0,35	0,55	0,71	0,92	0,98	0,99

Выражение эффективности сепарации частиц для прямоточного пылеконцентратора запишем в виде [18]

$$\eta_{нк} \approx \frac{K(1 - R_2^{2\nu+2})}{(1 - R_2^2) \left\{ (1 - K)R_1^{2\nu} + \frac{K}{(1 - R_2^2)} [1 - R_2^{2\nu+2}] \right\}}.$$

Здесь

$$2v = \alpha A, Q_{\text{отв}}/Q_{\text{вх}} = K.$$

Значение силовой функции  $A$  в прамоточном пылеотделителе находится из выражения

$$A(1 - R_*) = \frac{V_{\text{фл}}}{W_{\text{ц}}} \left[ \frac{1}{3} R_{\text{T}}^{0.4} + \frac{1}{0.4} (1 - R_{\text{T}}^{0.4}) \right]$$

$$\alpha^{-1} = \text{Stk} \text{Re}_{\delta, w} \frac{\mu}{\delta \rho} \frac{R_{\text{вх}} + R_{\text{вых}}}{2\varepsilon} = \text{Stk} W_{\text{ц}} \frac{R_{\text{вх}} + R_{\text{вых}}}{2\varepsilon}$$

$$\text{Stk} = \frac{2\tau W_{\text{ц}}}{R_{\text{вх}} + R_{\text{вых}}} \cdot \text{Re}_{\delta, w} = \frac{\delta \omega_x}{\nu f}, \omega_x = \tilde{\omega} = \frac{Q}{4\pi R r_1}$$

В [18] приведены расчеты фракционной эффективности сепарации для различных размеров, геометрических соотношений, различных долей отвода газа с концентратом пыли. Аналогичный пересчет, как для вихревого разгрузителя–концентратора, позволяет получить значения фракционной эффективности прамоточного пылеконцентратора, которые представлены в таблице 5.

Таблица 6 – Фракционная эффективность прамоточного пылеконцентратора

Размер частиц, мкм	2	4	6	15	20	30	60	90	120
$\eta_{\text{ипк}}$	0,10	0,13	0,3	0,726	0,98	0,99	0,999	0,999	0,999

Найдем фракционную эффективность сепарации пыли для циклона ЦН-11 диаметром 1000 мм по данным [8].

Фракционная эффективность циклонных аппаратов является функцией интеграла вероятности и может быть записана в общем виде  $\eta_i = \Phi(X_{\delta})$ , где

$$\Phi(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx, X_{\delta} = \frac{\lg(\delta / \delta_{50})}{\lg y_3}, X_{\Sigma} = \frac{\lg(\delta_m / \delta_{50})}{\sqrt{\lg^2 y_3 + \lg^2 y_4}}, \sigma_{\eta} = \delta_{84} / \delta_{50}.$$

$$\delta_{50} = \delta_{50}^T (D/D_T \cdot \rho_{\delta T} / \rho_{\delta} \cdot \mu / \mu_T \cdot W_T / W)^{0.5},$$

где динамическая вязкость газа  $\mu_T = 22,2 \cdot 10^{-6}$  Па·с; расходная плановая скорость  $W_T = 3,5$  м/с; диаметр цилиндрической части циклона  $D_T = 0,6$  м;

плотность частиц  $\rho_{\delta T} = 1930 \text{ кг/м}^3$ . Величины  $\delta_{50}^T=3,65 \text{ мкм}$ ,  $\lg \sigma_{\eta}=0,352$ – параметры, определяющие эффективность циклонов НИИОГАЗ по таблице 2.8. [8].

Рабочие параметры для используемых циклонов  $D=1,0 \text{ м}$ ,  $\rho_{\delta} = 2500$

$\text{кг/м}^3$ ,  $\mu=11,26 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ,  $W=W_T=3,5 \text{ м/с}$ ,

$$\delta_{50} = 3,65[(1/0,6) \cdot (1930/2500) \cdot (11,25/22,2) \cdot (3,5/3,5)]^{0,5}=2,9 \text{ мкм}.$$

Расчет фракционной эффективности используемых циклонов представлен в таблице 7.

Таблица 7 – Фракционная эффективность циклона ЦН-11,  $D_{\text{ц}}=1000 \text{ мм}$

Размер частиц, мкм	2	4	6	12	18	24	48	70	92
$X_i$	-1,11	0,24	0,87	1,72	2,227	2,58	3,43	3,93	4,29
$\eta_{i \text{ЦН-11}}$	0,13	0,59	0,81	0,95	0,98	0,99	0,99	0,999	0,999

Таблица 8 – Сводная таблица фракционной эффективности трех ступеней системы пыле- золоулавливания

Размер частиц, мкм	2	4	6	12	18	24	48	70	92
$\eta_{i \text{ВК}}$	0,002	0,02	0,05	0,35	0,55	0,71	0,98	0,99	0,999
$\eta_{i \text{ПК}}$	0,10	0,13	0,3	0,66	0,96	0,98	0,999	0,999	0,999
$\eta_{i \text{ЦН-11}}$	0,13	0,59	0,81	0,95	0,98	0,99	0,99	0,999	0,999

Фракционная эффективность трех ступеней системы пыле- золоулавливания и всей газоочистки по формуле приведена в сводной таблице 8.

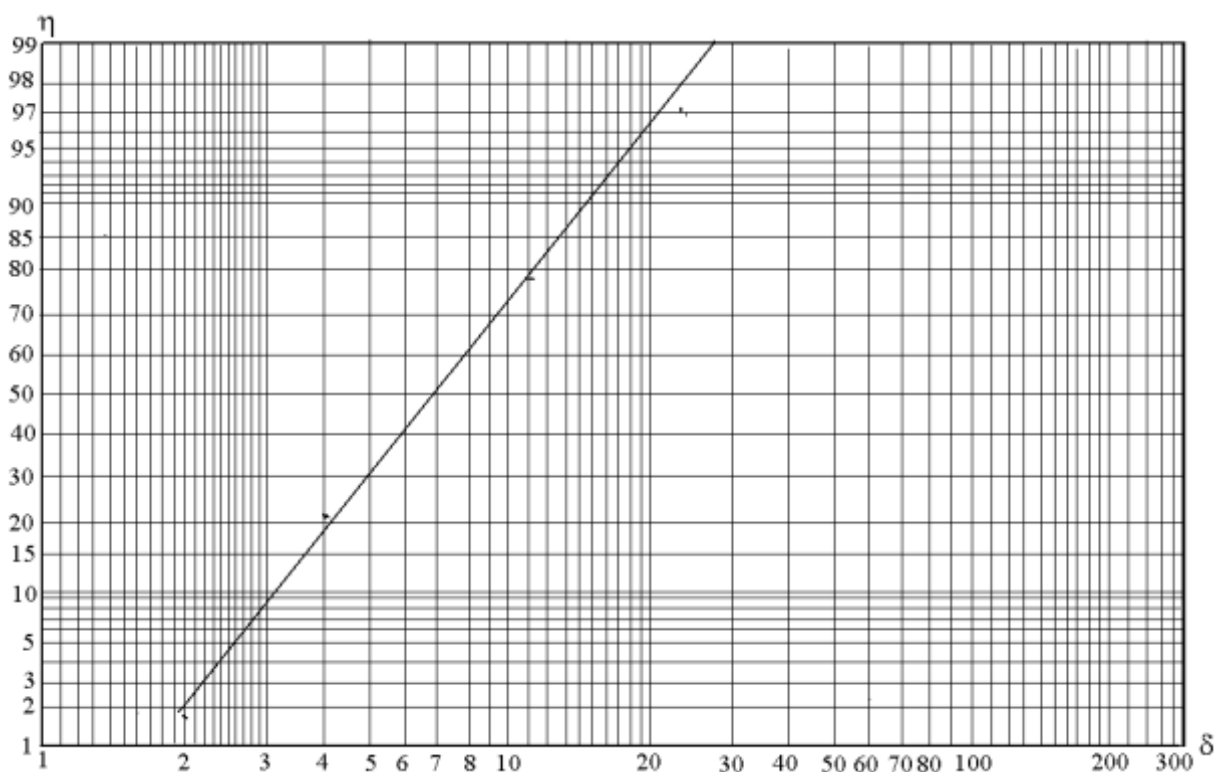
$$n = 1 - (1 - n_0)(1 - n_3)(1 - n_2)(1 - n_1),$$

где  $n_0, n_1, n_2, n_3$  - эффективность осаждения частиц в пылесборном бункере вихревой камеры-осадителя, на криволинейной поверхности вихревой камеры-осадителя, прямооточного пылеконцентратора и циклона.

Найдем общую эффективность сепарации частиц системы пыле- золоулавливания. Общая эффективность установки является функцией интеграла вероятности и может быть записана в общем виде  $\eta_i = \Phi(X^0)$ , где

$$X^0 = \frac{\lg \delta_m / \delta_{50}}{\sqrt{\lg^2 \sigma_\eta + \lg^2 \sigma_\zeta}}.$$
 В вероятностно-логарифмической сетке это

распределение выглядит прямой линией (рис. 15).



**Рисунок - 15.** Фракционная эффективность системы пылеулавливания

Здесь  $\delta_m$  - медианный размер улавливаемых частиц,  $\delta_{50}$  - размер частиц улавливаемых с эффективностью 50%,  $\lg \sigma_\eta = \lg \frac{\delta_{84.1}}{\delta_{50}} = \lg \frac{\delta_{50}}{\delta_{16}}$  - дисперсия частиц в функции распределения парциальных коэффициентов очистки, где  $\delta_{84.1}$ ,  $\delta_{50}$ ,  $\delta_{16}$  - размер частиц, улавливаемый с эффективностью 84.1, 50 и 16% соответственно.  $\lg \sigma_\zeta = \lg \frac{\delta_{84.1}}{\delta_m} = \lg \frac{\delta_m}{\delta_{16}}$  - дисперсионный состав пыли, где  $\delta_{84.1}$ ,  $\delta_m$ ,  $\delta_{16}$  - диаметр частиц, для которых суммарный вес всех частиц, имеющих размер меньше  $\delta_{84.1}$ ,  $\delta_m$  и  $\delta_{16}$ , составляет соответственно 84.1, 50 и 16% от общего веса пыли.

На рис. находим  $\delta_{84.1}$ ,  $\delta_{50}$ ,  $\delta_{16}$  - размер частиц, улавливаемый с эффективностью 84.1, 50 и 16% соответственно и определяем  $\lg \sigma_\eta$ . Для

системы пыле- золоулавливания  $\delta_{84,1} = 12$  мкм,  $\delta_{50} = 6$  мкм,  $\delta_{16} = 3$  мкм,  $\lg \sigma_{\eta} = \lg \frac{12}{6} = \lg \frac{6}{3} = \lg 2.0 = 0.301$ . Унос из печи неравномерен по времени и характеризуется большой крупностью, примем  $\delta_m = 90$  мкм,  $\sigma_{\eta} = 3$ . Подставляя полученные значения в выражение аргумента функции интеграла вероятности  $X^0 = \frac{\lg \delta_m / \delta_{50}}{\sqrt{\lg^2 \sigma_{\eta} + \lg^2 \sigma_{\eta}}} = \frac{\lg 90 / 6}{\sqrt{\lg^2 2 + \lg^2 3}} = \frac{1,17}{0,56} = 2,1$ , что соответствует эффективности улавливания 98,1%. При высокой концентрации пыли эффективность составляет более 99% [9]. По результатам сравнительных промышленных испытаний [19, 20] запыленность газов после КПЗУ в 5-6 раз меньше по сравнению с запыленностью газов после группового циклона.



## **5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

В данной дипломной рассматривается усовершенствование системы газопылеочистки (сухой газоочистки) в цехе обжига концентрата на цинковом заводе. Целью данного раздела является определение эколого-экономической эффективности мероприятия.

При реконструкции золоулавливающей установки цинкового завода в цехе обжига концентрата, не требуется строительства дополнительных зданий, а также нет затрат по охране и рациональному использованию водных ресурсов.

На выполнения проекта составляется перечень проводимых работ, определяются исполнители и время выполнения, устанавливается продолжительность дней выполненных работ.

### **5.1 Перечень работ и оценка времени их выполнения**

Таблица 5.1.1 - Прodelанные работы для проекта

№ п/п	Наименование работ	Количество исполнителей	Продолжительность, дней
1	Получение и выдачи задания	Научный руководитель, инженер	1
2	Подбор и изучение литературы для написания проекта	Инженер	4
3	Анализ эффективности существующей системы пылегазоочистки после системы печи обжига цинкового концентрата	Инженер	14
4	Сравнение и изучение пылеулавливателей	Инженер	10
5	Предложена система с вихревым разгрузителем потока, двойным концентрированием пыли и выносными циклонами пылеулавливателями	Научный руководитель, инженер	2
6	Расчет эффективности промышленной системы пылегазоочистки	Инженер	8
7	Сделан вывод по оценке эффективности пылеулавливания с учетом эффективности электрофильтра.	Инженер	1
8	Консультация с научным руководителям	Научный руководитель, инженер	1
Итого:			41

## 5.2 Смета затрат на проект

$$K_{\text{пр}} = U_{\text{мат}} + U_{\text{ам}} + U_{\text{зп}} + U_{\text{со}} + U_{\text{пр}} + U_{\text{накл}}, \text{ руб}$$

а)  $U_{\text{мат}}$  – материальные затраты на проект представлены в таблице 5.2.1

Таблица 5.2.1 – Материальные затраты на проект дипломной работы

№ п/п	Наименование товара	Количество, шт	Цена, рублей
1	Пачка бумаги	1	230
2	Ручки шариковые	2	50
3	Заправка картриджа	1	320
Итого			600

б)  $U_{\text{ам}}$  – амортизация;

$$KT = \frac{T_{\text{исп к.т.}}}{T_{\text{кол}}} \times C_{\text{к.т.}} \times \frac{1}{T_{\text{сл}}}, \text{ руб}$$

$T_{\text{исп к.т.}} = 30$  дней – время использования компьютера за период написания проекта;

$T_{\text{кол}} = 365$  – дней в году;

$C_{\text{к.т.}} = 20000$  руб. – цена компьютера;

$T_{\text{сл}} = 10$  лет – срок службы компьютера.

$$KT = \frac{30}{365} \times 20000 \times \frac{1}{10} = 164, \text{ руб}$$

в)  $U_{\text{зп}}$  – заработная плата;

Расчет заработной платы для инженера:

$$U_{\text{зп}}^{\text{мес}} = ЗП_0 \times k_1 \times k_2$$

$ЗП_0 = 14500$  – месячный оклад инженера;

$k_1 = 1,1$  – коэффициент, учитывающий отпуск;

$k_2 = 1,3$  – районный коэффициент.

$$U_{\text{зп}}^{\text{мес}} = 14500 \times 1,1 \times 1,3 = 20735, \text{руб}$$

Расчет заработной платы для научного руководителя:

$$U_{\text{зп}}^{\text{мес}} = \text{ЗП}_0 \times k_1 + Д \times k_2$$

$\text{ЗП}_0 = 23300$  – месячный оклад научного руководителя;

$Д = 2200$  – доплата за интенсивность труда научного руководителя

$$U_{\text{зп}}^{\text{мес}} = 23300 \times 1,1 + 2200 \times 1,3 = 36179, \text{руб}$$

Так как инженер работал над проектом 41 дней, то его заработная плата за период написания проекта составит:

$$U_{\text{зп}}^{\Phi} = \frac{U_{\text{зп}}^{\text{мес}}}{21} \times n$$

$U_{\text{зп}}^{\text{мес}} = 19800$  – заработная плата инженера за месяц;

$n$  – количество отработанных дней.

$$U_{\text{зп}}^{\Phi} = \frac{19800}{21} \times 41 = 38657, \text{руб}$$

Так как научный руководитель работал над проектом 5 дней, то его заработная плата за период написания проекта составит:

$$U_{\text{зп}}^{\Phi} = \frac{U_{\text{зп}}^{\text{мес}}}{21} \times n$$

$U_{\text{зп}}^{\text{мес}} = 36179$  – заработная плата научного руководителя за месяц;

$n$  – количество отработанных дней.

$$U_{\text{зп}}^{\Phi} = \frac{36179}{21} \times 4 = 6891, \text{руб}$$

$$\Phi \text{ЗП} = \text{ЗП}_{\text{инж}} + \text{ЗП}_{\text{нр}} = 38657 + 6891 = 45548 \text{руб}$$

г)  $U_{\text{со}}$  – социальные отчисления;

Социальные отчисления составляют 30% от  $\Phi \text{ЗП}$ .

$$U_{\text{со}} = 0,3 \times 45548 = 13664 \text{руб}$$

д)  $U_{\text{пр}}$  – прочие затраты;

$$U_{\text{пр}} = 10\% \times U_{\text{мат}} + U_{\text{ам}} + U_{\text{зп}} + U_{\text{со}}$$

$$U_{\text{пр}} = 0.1 \times 600 + 164 + 38657 + 6891 + 13664 = 5997$$

е)  $U_{\text{накл}}$  – накладные расходы;

$$U_{\text{накл}} = 200\% \times \Phi 3 \Pi$$

$$U_{\text{накл}} = 2 \times 47371 = 91096 \text{ руб}$$

Таблица 5.2.2 – затраты на проект

№ п/п	Элементы затрат	Стоимость, руб
1	Материальные затраты	600
2	Амортизация	164
3	Заработная плата	45548
4	Социальные отчисления	13664
5	Прочие затраты	5997
6	Накладные расходы	91096
$K_{\text{пр}}$		157069

### 5.3 Смета затрат на реконструкцию оборудования

$$K = K_{\text{проект}} + K_{\text{обор}} + K_{\text{мон}}$$

Цена нового пылегазоочистного оборудования – 3 000 000 руб.

на монтаж – 20%

$$\sum K = 3\,000\,000 + 600\,000 = 3\,600\,000 \text{ руб.}$$

Таблица 5.3.1 – затраты на проект установки газопылеочистки оборудования

№ п/п	Элементы затрат	Стоимость, руб
1	Новое газопылеочистное оборудование	3 000 000
2	На монтаж	600 000
Итого:		3 600 000

## 5.4 Социальный эффект

Ущерб вследствие неблагоприятной экологической обстановки на цехе можно оценить по следующей формуле:

$$Y_{\text{соц}} = Y_v + Y_{\text{б.л.}} + Y_{\text{пенс.}}$$

где  $Y_{\text{соц}}$  – ущерб цеха вследствие снижения производительности труда и дополнительных выплат пособий по временной и постоянной нетрудоспособности работников цеха в связи с их проф. заболеваниями;

$Y_v$  – снижение выпуска продукции из-за временной нетрудоспособности работников;

$Y_{\text{б.л.}}$  – выплаты по больничным листам в связи с временной нетрудоспособностью;

$Y_{\text{пенс.}}$  – выплаты пенсий в связи с досрочным выходом на пенсию по болезни.

В свою очередь

$$Y_v = B_{\text{см}} \cdot \sum_{i=1}^n t_i \cdot K_i \cdot \text{Ч}_{\text{ср.сп.}}$$

где  $B_{\text{см}}$  – средняя выручка цеха за смену на 1 работающего;

$t_i$  – средняя продолжительность болезни по  $i$  – му проф. заболеванием от общего числа работников;

$K_i$  – коэффициент, учитывающий процент заболевших  $i$ -м заболеванием от общего числа работников;

$\text{Ч}_{\text{ср.сп.}}$  – среднесписочная численность работников на цеха;

$n$  – количество разновидностей проф. заболеваний.

$$Y_{\text{б.л.}} = 3\Pi_{\text{см}} \cdot \sum_{i=1}^n t_i \cdot K_i \cdot \text{Ч}_{\text{ср.сп.}}$$

где  $3\Pi_{\text{см}}$  – средняя заработная плата одного работающего за смену.

$$Y_{\text{пенс.}} = B_{\text{мес}} \cdot 12 \cdot \text{Ч}_{\text{ср.сп.}} \cdot K_i \cdot K_{\text{пенс.}}$$

где  $B_{\text{мес}}$  – средняя пенсия в месяц одного пенсионера;

$K_{\text{пенс}}$  – коэффициент, учитывающий процент работников, выходящих досрочно на пенсию в связи с  $i$ -м проф. заболеванием от числа больных этим заболеванием.

Определить социальный эффект от установки системы газоочистки на рабочем месте, в результате чего произойдет снижение проф. заболеваний на 1%.

Среднесписочная численность работников на цеху  $Ч_{\text{ср.сп.}} = 130$  чел. Количество заболеваний в процентах от  $Ч_{\text{ср.сп.}}$  и длительность заболевания в календарных днях разных заболеваний равны:

1. заболевания верхних дыхательных путей – 5%,  $t_{\text{д.п.}} = 7$  дн.;
2. заболевание легких – 3%,  $t_{\text{л.}} = 21$  дн.;
3. заболевание органов пищеварения – 2%,  $t_{\text{о.п.}} = 15$  дн.

Производительность труда на цеху за рабочую смену составляет  $B_{\text{см}} = 5,5$  тыс. руб./чел. см.;

среднесписочная зарплата одного работника – 18 тыс. руб./чел. мес.;

средняя пенсия – 9 тыс. руб./чел. мес.

Досрочно на пенсию по болезни уходят 1% от числа заболеваний верхних дыхательных и легких.

Ущерб вследствие неблагоприятной экологической обстановки на цеху до внедрения системы газоочистки

$$Y_{\text{соц}} = Y_v + Y_{\text{б.л.}} + Y_{\text{пенс}},$$
$$Y_v = B_{\text{см}} \cdot \sum_{i=1}^n t_i \cdot K_i \cdot Ч_{\text{ср.сп.}} \cdot K_{\text{раб}}$$

где  $K_{\text{раб}}$  – коэффициент перевода календарных дней в рабочие

$$K_{\text{раб}} = 21/30 = 0,7$$

$$Y_v = 5,5 \times 130 (0,05 \times 7 + 0,03 \times 21 + 0,02 \times 15) \times 0,7 = 640,64 \text{ тыс. руб./год}$$

$$Y_v = 3П_{\text{см}} \cdot \sum_{i=1}^n t_i \cdot K_i \cdot Ч_{\text{ср.сп.}} \cdot K_{\text{раб}}$$

$$18/21 \times 130 \times (0,05 \times 7 + 0,03 \times 21 + 0,02 \times 15) \times 0,7 = 99,84 \text{ тыс. руб./год}$$

$$Y_{\text{пенс}} = B_{\text{мес}} \cdot 12 \cdot \chi_{\text{ср.сп.}} \cdot K_{\text{пенс}i} \cdot K_i = 9 \times 12 \times 130 \times 0,01 \times (0,05 + 0,03) = 11,232 \text{ тыс. руб./год}$$

$$Y_{\text{соц}} = 640,64 + 99,84 + 11,232 = 751,2 \text{ тыс.руб./год}$$

Ущерб после внедрения системы пылегазоочистки

$$Y' = Y'_v + Y'_{\text{б.л.}} + Y'_{\text{пенс.}}$$

$$Y'_v = 5,5 \times 130 \times (0,04 \times 7 + 0,02 \times 21 + 0,01 \times 15) \times 0,7 = 425,43 \text{ тыс.руб/год}$$

$$Y'_{\text{б.л.}} = 5/21 \times 130 \times (0,04 \times 7 + 0,02 \times 21 + 0,01 \times 15) \times 0,7 = 425,43 \text{ тыс.руб./год}$$

$$Y'_{\text{пенс}} = 0$$

$$Y' = 425,43 + 18,4 = 443,83 \text{ тыс. руб./год}$$

Социальный эффект от установки системы пылегазоочистки или предотвращенный социальный ущерб

$$\Delta Y = 751,2 - 443,83 = 307,37 \text{ тыс.руб./год, или}$$

$$\Delta Y = \Delta Y_v + \Delta Y_{\text{б.л.}} + \Delta Y_{\text{пенс}}$$

$$(5,5 + 5/21) \times 130 \times 0,7 \times 0,01 \times (7 + 21 + 15) + 9 \times 12 \times 0,01 \times 130 \times (0,05 + 0,03) = 235,8 \text{ тыс. руб./год.}$$

Вывод: в данном проекте рассматривалась усовершенствованная система газопылеочистки, расчет социального эффекта показал, что внедрение установки обеспыливания позволяет экономить ежегодно на социальный ущерб. В результате, что данная газопылеочистная установка уменьшает социальный ущерб на 235,8 тыс. руб., и снижает заболеваемость, нетрудоспособность и повышает работоспособность сотрудников, в том числе рост выпуска продукции.

## **6 Социальная ответственность**

«Социальная ответственность» обозначена международном стандарте ICCSR26000:2011 «Социальная ответственность организации».

Специалист должен вести профессиональную деятельность с учетом социальных, правовых, экологических и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности, нести социальную ответственность за принимаемые решения, осознавать необходимость устойчивого развития.

Социальная ответственность при разработке новых решений должна обеспечивать:

- исключение несчастных случаев;
- защиту здоровья работников;
- снижение вредных воздействий на окружающую среду;
- экономное расходование невозобновимых природных ресурсов.

Целью данного раздела является оценка системы газоочистной установки и условий труда, анализ вредных и опасных факторов, воздействующих на работника, разработка мер защиты от них, также рассмотрение вопросов техники безопасности, пожарной профилактики и охраны окружающей среды при работе в цехе обжига концентрата на цинковом заводе.

### **6.1 Производственная безопасность**

#### **6.1.1 Анализ вредных и опасных факторов**

Для выбора факторов необходимо использовать ГОСТ 12.0.003-74 «Опасные и вредные факторы. Классификация». Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды представлен в таблице 1.



Таблица 1 – Опасные и вредные фактора при работе оператора АСУ ТП

Источник фактора, наименование видов работы	Факторы (по ГОСТ 12.003-74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Объектом исследования является цинковый завод цех обжига концентрата (пылегазоочистное оборудование) для использования очистки технологических газов от обжиговых печей.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. микроклимат</li> <li>2. запыленность;</li> <li>3. загазованность;</li> <li>4. вибрация;</li> <li>5. шум;</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Электро-безопасность</li> <li>2. Термические ожоги</li> <li>3. Пожаро-взрывобезопасность</li> </ol>	<p><b>Микроклимат</b> – ГОСТ 30494-96 [23]</p> <p><b>Освещение</b> – ГОСТ 24940-96 [24]</p> <p><b>Шумы</b> – ГОСТ 12.1.003-83 [25]</p> <p><b>Вибрация</b> – ГОСТ 32107-2013 [26]</p> <p><b>Электробезопасность</b> – ГОСТ 12.1.030-81 [28]</p> <p><b>Пожарная безопасность</b> – ШНК 2.01.02-04 [29]</p>

## 6.4.1 Анализ вредных факторов

### 6.1.1.1 Отклонения показателей микроклимата

Микроклимат помещения - состояние внутренней среды помещения, оказывающее воздействие на человека, характеризуемое показателями температуры воздуха и ограждающих конструкций, влажностью и подвижностью воздуха.

Микроклимат помещений зданий характеризуется состоянием внутренней среды помещения, которая должна удовлетворять физиологическим и психологическим потребностям человека и обеспечивать стандартные минимальные качества жизни. Санитарные правила и нормы предназначены для предотвращения неблагоприятного воздействия микроклимата рабочих мест производственных помещений на самочувствие, функциональное состояние, работоспособность и здоровье человека.

В помещении должны быть обеспечены оптимальные параметры микроклимата, которые установлены по критериям оптимального теплового и функционального состояния человека.

Оптимальные параметры микроклимата — сочетание значений показателей микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека обеспечивают нормальное тепловое состояние

организма при минимальном напряжении механизмов терморегуляции и ощущение комфорта не менее чем у 80% людей, находящихся в помещении.

Допустимые параметры микроклимата — сочетания значений показателей микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека могут вызвать общее и локальное ощущение дискомфорта, ухудшение самочувствия и понижение работоспособности при усиленном напряжении механизмов терморегуляции не вызывают повреждений или ухудшения состояния здоровья.

В таблице 2 приведены допустимые параметры микроклимата воздуха рабочей зоны. По степени физической тяжести работа относится к категории средней тяжести Пб [23].

Таблица 2 – Нормируемое качество воздуха

Сезон года	Категория работы	Температура, С°	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный период года	П б	17-19	60-40	0,3
Теплый период года	П б	20-22	60-40	0,4

В зимний период времени (при работающей системе отопления) параметры температурно-влажностного состояния помещения определяются тепловой мощностью системы отопления и теплозащитными качествами наружной стены с одним или несколькими окнами.

В летний период (при выключенной системе отопления) в помещении с не кондиционируемым микроклиматом формируется температурно-влажностный режим, близкий по параметрам к наружной среде, а его параметры определяются теплозащитными качествами наружных ограждающих конструкций и естественным воздухообменом в помещении.

### 6.1.1.2 Вентиляция

Большое значение для охраны здоровья и труда человека имеет качество воздуха в производственных помещениях.

Пыль - мельчайшие твердые частицы, способные некоторое время находиться в воздухе во взвешенном состоянии. Образуется при рытье коммуникационных линий, монтаже зданий, отделочных работах, очистке поверхностей и др. Пыль характеризуется химическим составом, размером и формой частиц, их плотностью, электрическими, магнитными и другими свойствами. Степень измельченности пыли называется ее дисперсностью. Дисперсный состав может быть представлен в виде таблиц, математических выражений или графиков. Одна из основных характеристических величин пыли – скорость витания частиц, то есть скорость их осаждения под действием силы тяжести в невозмущенном воздухе. В зависимости от состава пыли изменяется ее вредность, к примеру, наиболее вредным для человека считается диоксид кремния  $\text{SiO}_2$ , который вызывает такое заболевание, как силикоз.

Для обеспечения нормальных метеоусловий и снижения концентрации пыли и других вредных веществ в операторной предусмотрены естественная и искусственная вентиляция. Естественная вентиляция осуществляется через вентиляционные короба, искусственная вентиляция – общая приточно–вытяжная. Кратность воздуха  $K = 3 \text{ ч}^{-1}$  – 3. Предусмотрено включение снаружи автомеханической вентиляции.

Воздуховоды изготавливают из не искрящего и нержавеющей материала, чтобы не возникло статистических зарядов. Воздуховоды заземляют.

Вентиляция позволяет осуществлять регулируемый воздухообмен, обеспечивающий нормальные санитарно-гигиенические условия в производственных помещениях.

В цехах завода используется общеобменная, механическая приточно-вытяжная вентиляция. Для очистки загрязненного воздуха, выбрасываемого в атмосферу, используются пылеотделители.

### **6.1.1.3 Недостаточная освещённость рабочей зоны**

Производственное освещение тоже является производственным фактором, характеризуется такими показателями, как световой поток (определяется мощностью лучистой энергии), освещенность, яркость, сила света. Опасно тем, что при пере- или недозировке определенного количества люкс, ватт, кандел возможно испортить, а то и потерять зрение.

Основные требования, предъявляемые к производственному освещению, это соответствие освещенности характеру зрительной работы (т.е. соответственное увеличение освещенности рабочих поверхностей), достаточно равномерное распределение яркости (для того, чтобы глазам не приходилось переадаптироваться), отсутствие резких теней на рабочей поверхности (уменьшает утомление зрения), отсутствие блескости (слепящего действия света), постоянство освещенности во времени, обеспечение электро-, взрыво- и пожаробезопасности. Эти требования могут быть соблюдены при правильном выборе типа и системы производственного освещения, которые подразделяются на: естественное (дневной свет), искусственное (электрические источники), смешанное (естественное дополняет искусственное, что является наиболее экономичным и разумным), общее (вся территория; равномерно), комбинированное (локально, обособленные рабочие поверхности), аварийное (при недопущении перерывов в работе), эвакуационное (в местах эвакуации и повышенного травматизма).

Выбор источника света зависит от освещаемого предмета или территории. Различают два вида источников света: тепловое (лампы накаливания и галогенные лампы накаливания) и люминесцентное (длинные трубчатые газоразрядные лампы).

## Расчет искусственного освещения

Правильно спроектированное и выполненное освещение в цехе, обеспечивает возможность нормальной производственной деятельности.

Задачей расчета искусственного освещения является определение числа светильников, их типа, мощности источников света.

К числу источников света массового применения относятся лампы накаливания, лампы ДРЛ, люминесцентные лампы.

Основным источником света, как для общего, так и для комбинированного освещения, являются люминесцентные лампы: ЛДЦ ЛД, ЛХБ, ЛБ, ЛТБ. Из них наиболее экономичными являются лампы типа ЛБ.

Применение на рабочих местах одного местного освещения не допускается. Общее равномерное освещение применяется для тех помещений, где работа производится по всей площади, и нет необходимости в лучшем освещении отдельных участков.

Система общего локализованного освещения применяется тогда, когда в производственном помещении есть участки, на которых проводятся работы с высоким зрительным напряжением.

Осветительные приборы:

- Люминесцентные лампы – открытые двухламповые светильники типа ОД, ОЛОП, ОДО, ШОТ, ООД – для нормальных помещений с хорошим отражением стен и потолка;

- Светильники ПВЛ–являются пылевлагозащищенными, пригодны для некоторых пожароопасных помещений. Мощность лампы 2х40 Вт;

- Плафоны потолочные – для общего освещения закрытых, сухих помещений:

- Л71ВОЗ – мощность лампы 10х30 Вт.

- Л71В84 – мощность 8х40Вт.

Величина освещенности корректируется с учетом коэффициента запаса, так как со временем за счет загрязнения светильников и уменьшения

светового потока лампы освещённость снижается. Значения коэффициента запаса указаны в таблице 3.

Таблица 3 – Значение коэффициента запаса

Характеристика объекта	Люминесцентные лампы	Лампы накаливания
Помещения с большим выделением пыли	2,0	1,7
Помещения со средним выделением пыли	1,8	1,5
Помещения с малым выделением пыли	1,5	1,3

При выборе расположения светильников необходимо руководствоваться двумя критериями:

1. обеспечение высокого качества освещения, ограничение ослеплённости и необходимой направленности света на рабочие места;
2. наиболее экономичное создание нормированной освещённости.

Расчет искусственного освещения:

Система освещения производственных помещений:

- Общее равномерное освещение лампами накаливания;

Тип светильника:

- Универсальный без затемнителя;

Выполняемые работы имеют высокую точность и относятся к 1 категории.

$$E_n = 2000 \text{ лк}$$

Размеры производственного помещения:

- Высота 5 м;
- Длина 48 м;
- Ширина 9 м;

Потолок и стены светлые, пол темный.

$$\text{Площадь помещения: } S = AB = 9 \cdot 48 = 432 \text{ м}^2.$$

Находим величину минимально допустимой табличной освещённости:  $E_n = 100 \text{ лк}$ .

По условию слепящего действия высота подвеса светильника над полом: 4м.

Свес светильника:  $h_e = 1м$ .

Тогда высота подвеса светильника над рабочей поверхностью:  
 $h = 6 - 1 - 0.8 = 4.2м$ ,

где 0.8 – высота рабочей поверхности.

Произведем предварительную разметку светильников. Расстояние между светильниками  $L$  определяется, как выгоднейшее:

$$\frac{L}{h} = 1.1; L = 1.1 \cdot 4.2 = 4.64м.$$

Устанавливаем светильники по длине (отступив от стен 2м) на расстоянии 4.4м.

Устанавливаем светильники по ширине (отступив от стен 2м) на расстоянии 5м.

В результате разметки принимаем 20 светильников.

Для определения коэффициента использования находим индекс помещения:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{432}{4.2 \cdot (48 + 9)} = 1.8.$$

Коэффициент использования:  $\eta = 0.43$ .

$$\text{Расчетный световой поток: } F = \frac{E_n kSZ}{\eta} = \frac{100 \cdot 1.3 \cdot 432 \cdot 1.1}{20 \cdot 0.43} = 7183.3 \text{ Лм},$$

где  $k$  - коэффициент запаса;

$Z$  - коэффициент, учитывающий отклонение от средней величины.

По полученному потоку подбираем мощность лампы для работы на напряжение 220 В. Наиболее подходящей лампой является лампа мощностью 500 Вт со световым потоком 8100 лм.

$$\frac{7183.3}{8100} = 0.88; 20 \cdot 0.88 = 17.7 \text{ шт.}$$

Принимаем 18 светильников. В связи с этим проведем окончательную разметку светильников.

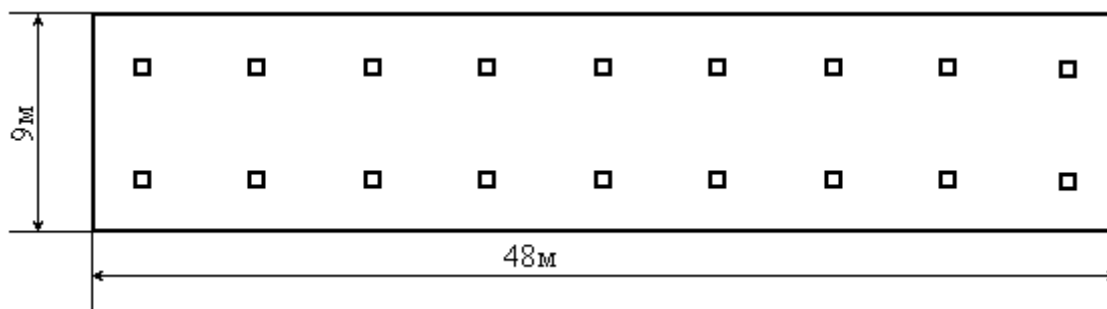


Рисунок 1 – План помещения в масштабе.

Рассчитав искусственное освещение можно с уверенностью сказать, что оно обеспечивает возможность нормальной производственной деятельности и высокого качества освещения, ограничивает ослеплённость и необходимую направленность света на рабочие места.

#### **6.1.1.4 Повышенный уровень шума**

Шум относится к вредным факторам производства, как и звук, возникает при механических колебаниях в твердых, жидких и газообразных средах. Шумом являются различные звуки, мешающие нормальной деятельности человека и вызывающие неприятные ощущения. Звук представляет собой колебательное движение упругой среды, воспринимаемое человеческим органом слуха. Повышение звукового давления негативно влияет на орган слуха; для измерения громкости (в децибелах Дб) используется двушкальный шумомер. В цехах допускается громкость около 100 Дб; в кузнечных цехах эта цифра возрастает до 140 Дб. Громкость выше 140 Дб может вызывать болевой эффект [25].

Существует доказанное вредное воздействие инфра и – ультразвука на человеческий организм (ниже 20 Гц и выше 20кГц частоты соответственно). Хотя колебания не вызывают болевых ощущений, они производят специфическое физиологическое воздействие на организм человека.

Объективно действия шума проявляются в виде повышения кровяного давления, учащенного пульса и дыхания, снижения остроты слуха,



ослабления внимания, некоторые нарушения координации движения, снижения работоспособности. Субъективно действия шума могут выражаться в виде головной боли, головокружения, бессонницы, общей слабости. Комплекс изменения, возникающий в организме под влиянием шума, в последнее время рассматривается медиками как “шумовая болезнь”.

В качестве защиты от шума и звука следует применять нормирование; некоторые технические тонкости, звукоизоляцию, звукопоглощение, специальные глушители аэродинамического шума, средства индивидуальной защиты (наушники, беруши, противошумные каски, специальная противошумная одежда).

#### **6.1.1.5 Повышенный уровень вибраций**

Гигиеническое нормирование вибраций регламентирует параметры производственной вибрации и правила работы с виброопасными механизмами и оборудованием [26].

Вибрация определяется следующими основными параметрами:

- частота  $f$ , Гц;
- амплитуда колебаний  $d$ , мм.

Таблица 4 – Гигиенические нормы вибрации

Вид вибрации	Допустимый уровень вибростойкости, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц			
	2	4	8	50
Технологическая	108	99	93	92

Методы защиты от вибрации:

- снижение вибрации в источнике ее возникновения: замена динамических технологических процессов статическими, тщательный выбор режима работы оборудования, тщательная балансировка вращающихся механизмов;

- уменьшение параметров вибрации по пути ее распространения от источника: вибродемпфирование, виброгашение, виброизоляция, жесткое присоединение агрегата к фундаменту большой массы, средства индивидуальной защиты (специальные рукавицы, перчатки, прокладки, виброзащитная обувь).

## **6.1.2 Анализ опасных факторов**

### **6.1.2.1 Электробезопасность**

Требования электробезопасности данного объекта направлены на создание условий эксплуатации оборудования, при которых исключаются образование электрической цепи через тело человека.

Важным фактором безопасности является заземление оборудования путем присоединения к контуру заземления. Заземляющее устройство является одним из средств защиты персонала в помещении от возникновения искры, от напряжения, возникающего на металлических частях оборудования, не находящихся под напряжением, но могущих оказаться под ним в результате повреждения изоляции [27].

Все сооружения установок, в зависимости от категории, должны быть надежно заземлены при помощи заземляющих устройств от прямых ударов, вторичных проявлений молнии и статического электричества.

Каждая часть электроустановки, подлежащая заземлению, присоединяется непосредственно к сети заземления при помощи отдельного ответвления. Последовательное включение в заземляющий проводник заземляющих частей и электроустановок.

Для защиты от накопления и проявления зарядов статического электричества на оборудовании, на теле человека и на перекачиваемых веществах должны предусматриваться следующие меры, обеспечивающие стекание возникающих зарядов и предотвращение накопления заряда выше уровня 0.4 А/мин [28]:

- отвод зарядов путем заземления корпусов оборудования и коммуникаций, а также обеспечение постоянного электрического контакта нефтепродуктов и тела человека с заземлением;
- отвод зарядов путем уменьшения удельных, объемных и поверхностных электрических сопротивлений.

Заземляющие устройства для защиты от статического электричества должны объединяться со специальными устройствами заземления другого назначения или использовать естественные заземлители.

#### **6.1.2.2 Термические ожоги**

Термические ожоги возникают вследствие попадания на тело горячей жидкости, пламени или соприкосновения кожи с раскаленными предметами.

Наиболее тяжело протекают ожоги, вызванные пламенем, так как температура пламени на несколько порядков выше температуры кипения жидкости.

Ожоги первой степени - это повреждения рогового слоя клеток кожи, которые проявляются покраснением ошпаренных участков кожи, незначительным отеком и жгучими болями, которые довольно быстро проходят. При ожогах второй степени полностью повреждается роговой слой кожи. Ошпаренная кожа - интенсивно-красного цвета, появляются пузыри, наполненные прозрачной жидкостью, ощущается резкая боль. Ожоги третьей степени образуются при повреждении более глубоких слоев кожи. На коже кроме пузырей образуются струпья. Обугливание кожи, подкожной клетчатки и ниже расположенных тканей вплоть до костей типично для ожогов четвертой степени.

Если на человеке вспыхнула одежда, необходимо немедленно снять его или определить одеяло, пальто, мешок, тем самым прекратив доступ воздуха к огню.

После сбивания пламени с потерпевшего на ожоговые раны следует наложить стерильные повязки (из марли или подручного материала). При

этом не следует отрывать от ошпаренной поверхности прилипшую одежду, лучше его обрезать ножницами. Пострадавшего с обширными ожогами следует завернуть в выглаженную простыню, наполнить снегом, льдом или холодной водой полиэтиленовые пакеты, пластиковые бутылки и обложить ими ожоговую поверхность поверх сухой простыни или пеленки, дать пострадавшему две-три таблетки анальгина, обеспечить полный покой до приезда врачей, выпить большое количество жидкости. Пузыри ни в коем случае нельзя прокалывать. Повязки должны быть сухими, ожоговую поверхность не следует смазывать различными жирами, яичным белком.

Если ожог очень тяжелый, пострадавшему нельзя ничего пить - на случай, если его отправят в больницу и будет необходима срочная операция.

## **6.2 Экологическая безопасность**

Важными направлениями охраны окружающей среды следует считать совершенствование технологических процессов и разработку нового оборудования с меньшим уровнем выбросов в окружающую среду, замену и по возможности широкое применение дополнительных методов и средств защиты окружающей среды.

Экологическая безопасность - это комплексная проблема, требующая усилия учёных многих специальностей. Наиболее активной формой защиты окружающей среды от вредного воздействия выбросов промышленных предприятий, является полный переход к безотходным и малоотходным технологиям и производствам. Это требует решения целого комплекса сложных технологических и конструктивных задач, основанных на исследовании новейших научно-технологических достижений.

В качестве дополнительных средств защиты применяют аппараты и системы для очистки газовых выбросов, сточных вод от примесей, глушителей шума, виброизоляторы технологического оборудования. Важную роль в защите окружающей среды отводится мероприятиям по рациональному размещению источников загрязнения: оптимальное

расположение промышленных предприятий с учетом местности; установление санитарно-защитных норм вокруг промышленных предприятий.

На обмоточном участке в процессе работы образуются такие вещества как пыль, и аэрозоли. Для их удаления применяют вытяжную вентиляцию, для снижения выбросов этих веществ в атмосферу применяют фильтры.

Вследствие использования работниками душевых и туалетов образуются жидкие отходы для удаления, которых применяют канализационную систему.

Также из-за использования обтирочных материалов образуются твердые отходы, для которых предусмотрены места хранения, и в конце смены они очищаются. При удалении отходов с территории предприятия им присваиваются категории опасности и вывозятся на соответствующие полигоны (промышленных отходов, токсичных отходов и т.д.).

### **6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

#### **6.3.1 Пожарная безопасность**

Пожаром называется неконтролируемое горение вне специального очага, наносящего материальный ущерб. Понятие пожарная безопасность означает состояние объекта, при котором с установленной вероятностью исключается возможность возникновения и развития пожара и воздействия на людей опасных факторов пожара, а также обеспечивается защита материальных ценностей.

Ответственность за соблюдения необходимого противопожарного режима и современное выполнение противопожарных мероприятий возлагается на руководителя предприятия. Руководители предприятия обязаны обеспечить полное своевременное выполнение правил пожарной безопасности и противопожарных требования строительных норм при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов; организовать на

предприятию пожарную охрану, добровольную пожарную дружину и пожарно-техническую комиссию и руководить ими.

Участок относится к категории «Б».

Для тушения пожара широко применяются различные химические средства, выбрасываемые в очаг пожара с помощью огнетушителей.

Например: углекислотные огнетушители типов ОУ-2А, ОУ-5, ОУ-8 и другие, предназначенные для тушения возгорания различных материалов и электроустановок. Согласно ПУЭ при сдаче в эксплуатацию электростанции должны быть обеспечены противопожарными средствами и инвентарём.

Поэтому устанавливается в помещении РУ-0,4 кВ пожарный инвентарь в который входит [29]:

- ручные углекислотные огнетушители ОУ-2, ОУ-5;
- ящик с песком 3м<sup>3</sup> - 1шт;
- асбест 2 х 1,5м –1шт;
- ведро - 2 шт;
- лопата - 2шт;
- багор.

Профилактические мероприятия, предупреждающие возникновение пожаров.

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на организационные, технические, режимные и эксплуатационные. Организационные мероприятия предусматривают: правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий, территории, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, организацию добровольных пожарных дружин, пожарно-технических комиссий, издание приказов по вопросам усиления пожарной безопасности и т. д.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил и норм при проектировании зданий, при обустройстве электропроводки и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

Мероприятия режимного характера - это запрещение курения в не установленных местах, производство огневых работ в пожароопасных помещениях.

Эксплуатационными мероприятиями являются своевременные профилактические осмотры, ремонты и испытания технологического оборудования.

В пожарную профилактику при проектировании и строительстве промышленных предприятий и строительстве промышленных предприятий входят такие мероприятия:

- группирования в отдельные комплексы объектов, родственных, по фундаментальному назначению и признаку пожарной опасности с учётом рельефа местности.
- устройство противопожарных резервуаров и преград;
- предусмотренные пути эвакуации людей на случай пожара;
- удаление дыма с помещений при пожаре;
- повышение огнестойкости зданий и сооружений путем облицовки или оштукатуривании металлических конструкции.

План эвакуации при пожаре и Ч.С показан на рисунке 1.

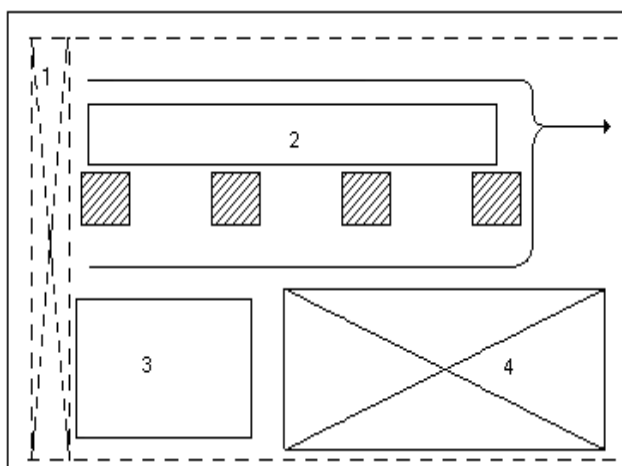


Рисунок 2 – План эвакуации

#### **6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Государственный надзор и контроль в организациях независимо от организационно–правовых форм и форм собственности осуществляют специально уполномоченные на то государственные органы и инспекции в соответствии с законами.

Согласно [30] в условиях непрерывного производства нет возможности использовать режим рабочего времени по пяти– или шестидневной рабочей неделе. По этой причине применяются графики сменности, обеспечивающие непрерывное обслуживание производственного процесса, работу персонала сменами постоянной продолжительности, регулярные выходные дни для каждой бригады, постоянный состав бригад и переход из одной смены в другую после дня отдыха по графику.

На объекте применяется четырех - бригадный график сменности. При этом ежесуточно работают три бригады, каждая в своей смене, а одна бригада отдыхает. При составлении графиков сменности учитывается предоставление работникам еженедельного непрерывного отдыха продолжительностью не менее 42 часов.

Государственный надзор и контроль в организациях независимо от организационно–правовых форм и форм собственности осуществляют специально уполномоченные на то государственные органы и инспекции в соответствии с законами.

#### *Заключение*

*«Социальная ответственность» обозначена в международном стандарте ICCSR26000:2011 «Социальная ответственность организации». Специалист должен вести профессиональную деятельность с учётом социальных, правовых, экологических и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности, нести социальную*



ответственность за принимаемые решения, осознавать необходимость устойчивого развития.

В данной работе приведены технические решения и модернизации, позволяющие уменьшить загрязнение окружающей среды, выполнить необходимые требования производственной санитарии и уменьшить социальную напряженность в обществе.

## **Заключение**

Выполнен анализ гидродинамических режимов системы обжига концентрата и очистки газов в производстве цинка. Особенностью гидродинамических процессов является нестационарность потоков газов и концентраций частиц.

Выполнен анализ эффективностей различных типов пылеулавителей применительно к процессу очистки газов в обжиговом цехе; групповые циклоны пропускают в 8-10 раз больше пыли, чем одиночные циклоны с собственными приемниками пыли.

Выполнен анализ эффективности существующей системы газоочистки после системы печи обжига цинкового концентрата. Система нестационарная по выбросам пыли, расходу газа и перепадам давления.

Вместо группового циклона предложена система с вихревым разгрузителем потока, двойным концентрированием пыли и выносными циклонными пылеуловителями. По сравнению с групповыми циклонами унос пыли уменьшается 5-6 раз, причем система устойчива в работе при переменных расходах газа и концентрациях пыли.

Предложен метод расчета, очистки газов циклонов типа ЦН, которые позволяет быстро рассчитать эффективность по дисперсному составу пыли и конструктивным соотношением циклона.

Дана сравнительная оценка эффективности пылеулавливания всей системы обеспыливания с учетом эффективности электрофильтра.

Виду загазованности территории, требуется проведение диагностики всей аппаратуры в целом с выявлением негерметичности и устройством аспирации с выводом выделяющихся газов в существующую аварийную трубу высотой 120 метров.

Рассчитан социальный эффект, и показано что внедрения установки обеспыливания позволяет экономить ежегодно на социальный ущерб. В результате, что данная установка (газопылеочистная) уменьшает социальный ущерб на 235,8 тыс. руб., и снижает заболеваемость, нетрудоспособность и

повышает работоспособность сотрудников, в том числе рост выпуска продукции.

*«Социальная ответственность» обозначена в международном стандарте ICCSR26000:2011 «Социальная ответственность организации».*

Специалист должен вести профессиональную деятельность с учётом социальных, правовых, экологических и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности, нести социальную ответственность за принимаемые решения, осознавать необходимость устойчивого развития.

В данной работе приведены технические решения и модернизации, позволяющие уменьшить загрязнение окружающей среды, выполнить необходимые требования производственной санитарии и уменьшить социальную напряженность в обществе.

### Список использованных источников

1. «Металлургия тяжелых цветных металлов» Марченко Н.В., Сибирский Федеральный Университет, Красноярск 2009г., 394с.
2. Кучин Г.М. Обжиг цинковых концентратов в кипящем слое. - М.: Metallurgy, 1966.
3. [http://knowledge.allbest.ru/manufacture/2c0b65635a2ad78a4c53b88521206c37\\_0.html](http://knowledge.allbest.ru/manufacture/2c0b65635a2ad78a4c53b88521206c37_0.html)
4. Старк С.Б., «Пылеулавливание и очистка газов в металлургии» Москва изд. «Металлургия» 1977. 320с.
5. «Улавливание и утилизация пылей и газов» С.И. Денисов, Москва «Металлургия» 1991. 319с.
6. Зимон А.Д., Андрианов Е.И. Аутогезия сыпучих материалов.– М.: Metallurgy, 1978.– 288 с.
7. Василевский М.В. Обеспыливание газов инерционными аппаратами. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008.–248 с.
8. Справочник по пыле- и золоулавливанию/ Под ред. М.И.Биргер, А.Ю.Вальдберг, Б.И.Мягков и др. Под общей ред. А.А.Русанова. - 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1983. - 312 с..
9. Страус В. Промышленная очистка газов: Пер с англ. –М.: Химия, 1981, 616 с.
10. Василевский М.В. Транспортировка и осаждение частиц в технологиях переработки дисперсных материалов / М.В. Василевский, В.И. Романдин, Е.Г.Зыков; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 288 с.
11. Василевский М.В., Зыков Е.Г., Логинов В.С. Устойчивость газоочистки в циклонном пылеуловителе // Изв. РАН Энергетика, 2005. – №5. –С. 113–124.
12. Василевский М.В. Практикум по методам защиты атмосферы от вредных выбросов: учебное пособие / М.В. Василевский, А.С. Разва;

- Томский политехнический университет. – Томск: изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 223 с.
13. Василевский М.В., Турдыева М.Б., Зыков Е.Г. Расчет показателя эффективности циклонных обеспыливателей газов серии ЦН. Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность: материалы XXI всероссийской научно –технической конференции / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во «Скан» , 2015. – 2 Т. – с. 43– 47.<http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2015/C15/V2/019.pdf>
  14. Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрыбин Г.М. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. – Л.: Химия, 1982. – 256 с.
  15. Идельчик И.Е. Аэродинамика промышленных аппаратов (подвод, отвод и равномерная раздача потока). М.: Энергия, 1964, 289 с.
  16. Пат. 2325953 Рос. Федерация. Пылеотделитель/ М.В. Василевский, Е.Г. Зыков, А.С. Разва, В.С. Логинов; заявл. 09.01.2007; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 16.
  17. Зыков Е. Г. Совершенствование процесса обеспыливания газов при модернизации промышленных систем пыле- и золоулавливания с инерционными аппаратами. Дисс. кандид. техн. наук . Томск политехн. университет. 2005.
  18. Василевский М.В., Зыков Е.Г. Расчет эффективности очистки газа в инерционных аппаратах: Учебное пособие.- Томск: Изд-во ТПУ, 2005.- 88 с.
  19. Василевский М.В., Зыков Е.Г., Логинов В.С., Разва А.С., Некрасова К.В., Литвинов А.М., Глушко А.Ф., Кузнецов В.А.. Устойчивость обеспыливания воздуха инерционными аппаратами в аспирационных сетях конвейерных систем.// Цемент и его применение– 2009, №1, с. 17–19.

20. Василевский М.В., Зыков Е.Г., Логинов В.С., Разва А.С., Снежко В.Д. Очистка газов от золы за котлом КЕ-10/14 // Промышленная энергетика, 2008, № 1, с.49–52.
21. «Технико-экономическое обоснование проектов по инженерной защите окружающей среды» Методические указания по выполнению экономического раздела выпускной квалификационной работы, Томск: Изд. ТПУ 2005. – 52 с.
22. ГОСТ 12.0.003-74 «Опасные и вредные факторы. Классификация»
23. ГОСТ 30494-96. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях.
24. ГОСТ 24940-96. Здания жилые и общественные. Методы измерения освещенности.
25. ГОСТ 12.1.003-83. Шум. Общие требования безопасности.
26. ГОСТ 32107-2013. Вибрация. Измерения вибрации, передаваемой машиной через упругие изоляторы. Общие требования
27. Белов С.В. Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды: учебник для вузов. – М.: Изд-во Юрайт, 2013. – 671с.
28. ГОСТ 12.1.030-81. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
29. ШНК 2.01.02-04. Пожарная безопасность зданий и сооружений.
30. Трудовой кодекс Республики Узбекистан от 21.12.1995.

## Приложение А

Таблица А1 – Требуемые технико–экономические показатели очистки газов обжига цинковых концентратов

Пылевынос из печей кипящего слоя, т/т концентрата	До 40%
Количество газов на выходе из печи, м <sup>3</sup> /т концентрата	20 тыс.м <sup>3</sup>
Подсосы атмосферного воздуха по системе газоочистки, %	Не более 5%
Средняя скорость газов в электрофильтре, м/с	1,0
Запыленность газов, г/м <sup>3</sup> ; на входе в циклоны на входе в электрофильтры после электрофильтров	150 10 0,18
Степень улавливания пыли в электрофильтре, %	98,8
Пылевынос после электрофильтров, кг/т концентрата	3,6
Производительность печей «КС» по концентрату т/сут	100–150

## Приложение Б

Температура газа: на входе в электрофильтр не более  $350^{\circ}\text{C}$   
на выходе из электрофильтра не менее  $250^{\circ}\text{C}$ .

Нагрузка на полях:

### Секция 1

1 поле	2 поле	3 поле
$U_1 - 240 \div 280 \text{ V}$	$U_2 - 250 \div 280 \text{ V}$	$U_3 - 260 \div 280 \text{ V}$
$I_1 - 5 \div 10 \text{ A}$	$I_1 - 5 \div 15 \text{ A}$	$I_3 \text{ т- } 10 \div 20 \text{ A}$
$I_2 - 30 \div 40 \text{ mA}$	$I_2 - 35 \div 50 \text{ mA}$	$I_3 - 40 \div 60 \text{ mA}$

### Секция 2

$U_1 - 240 \div 280 \text{ V}$	$U_2 - 250 \div 280 \text{ V}$	$U_3 - 260 \div 280 \text{ V}$
$I_1 - 5 \div 10 \text{ A}$	$I_1 - 5 \div 15 \text{ A}$	$I_1 - 10 \div 20 \text{ A}$
$I_2 - 30 \div 40 \text{ mA}$	$I_2 - 35 \div 50 \text{ mA}$	$I_2 - 40 \div 60 \text{ Ma}$

где  $U$  – напряжение,  $I_1$  – ток первичный,  $I_2$  – ток вторичный.

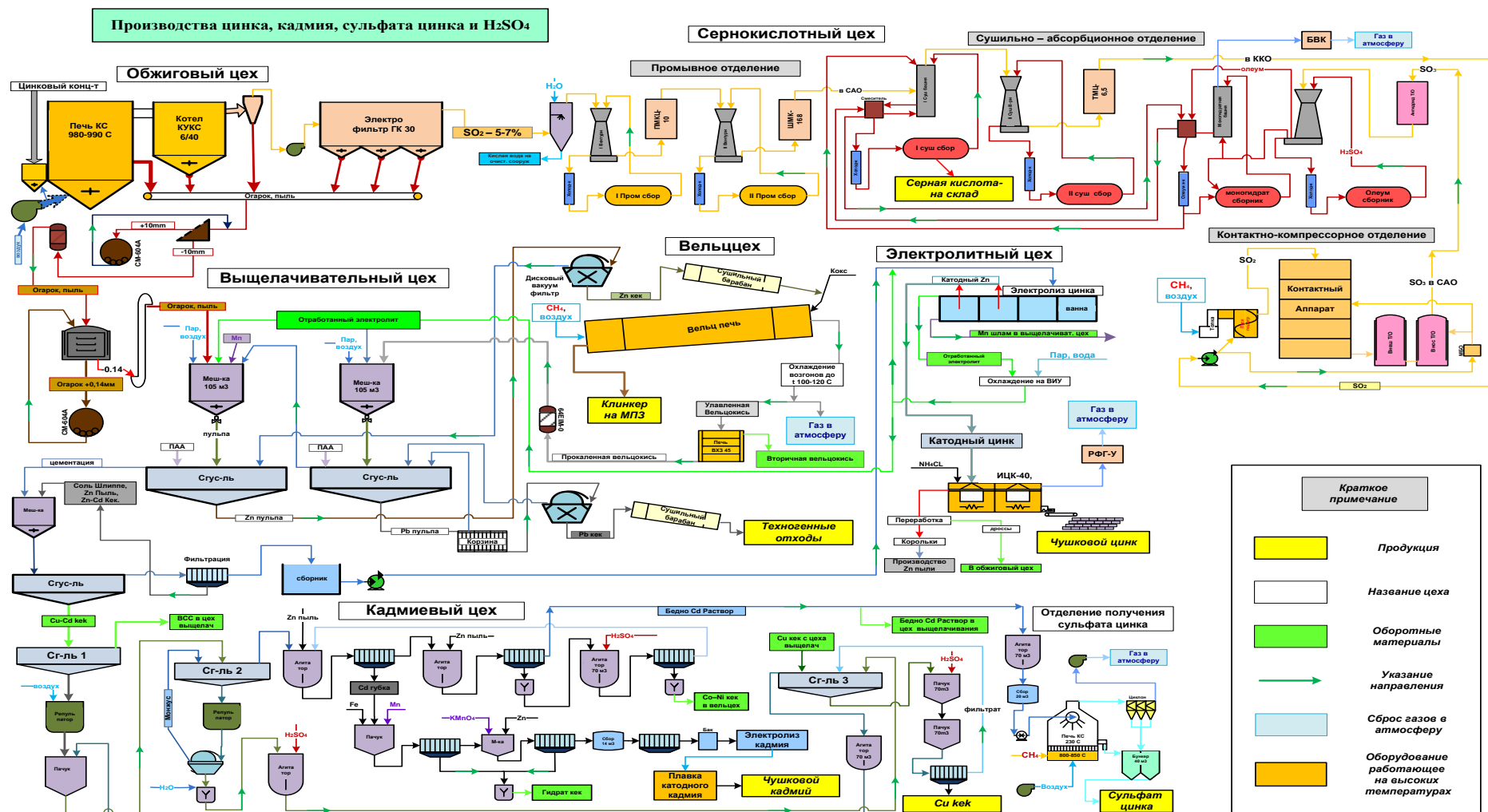
Давление в коллекторе грязного газа -  $0 \div 2 \text{ мм H}_2\text{O}$ .

Запыленность газов после электрофильтров не более  $0,18 \text{ г/м}^3$ .

Разрежение в коллекторе чистого газа -  $14 \div 16 \text{ мм H}_2\text{O}$

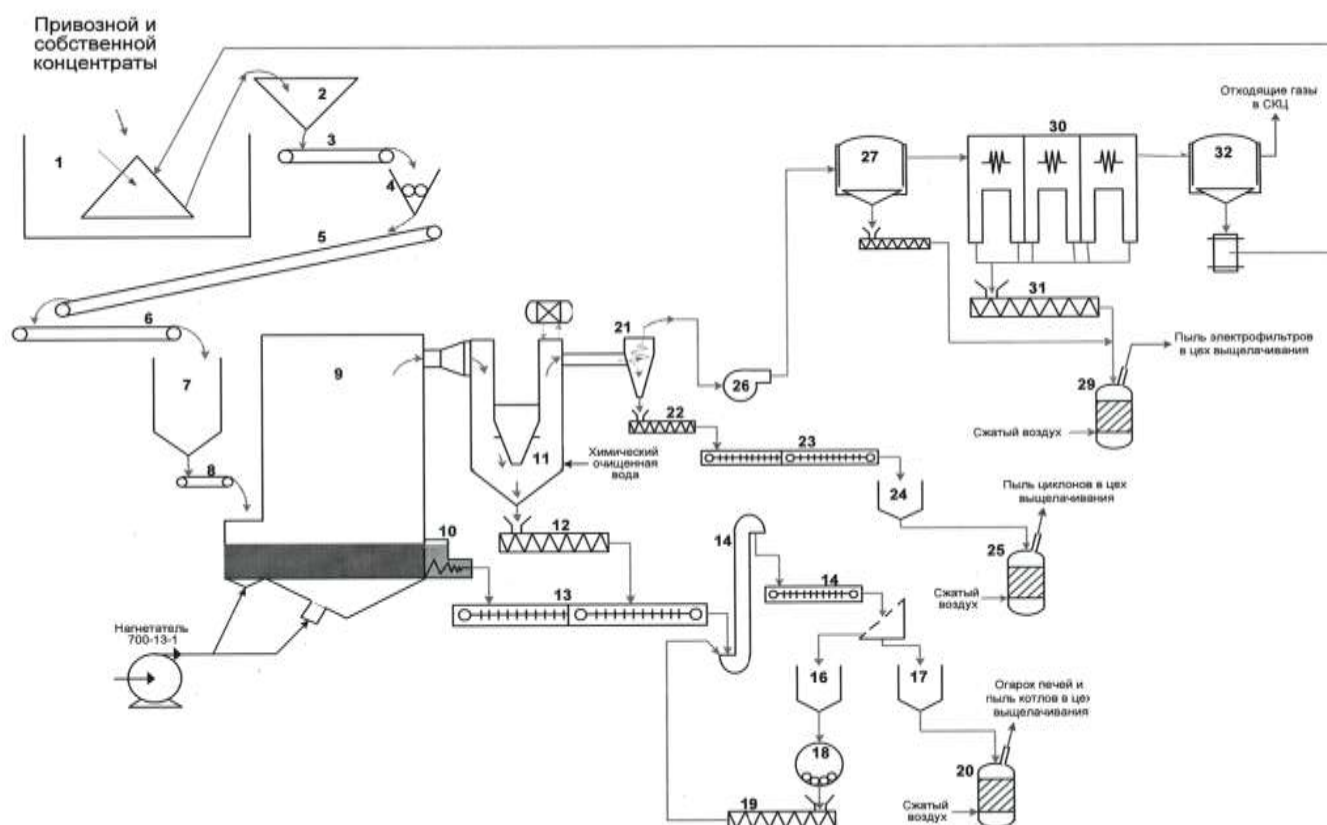


## Приложение В



Приложение В1 – Технологическая схема цинкового производства

## Приложение Г



**Рисунок Г1 - Схема цепи аппаратов обжигового цеха ЦЗ**

1 – отсек склада концентратов; 2 – бункер шихты; 3 – конвейер ленточный; 4–дисковая дробилка; 5–конвейер ленточный наклонный; 6–конвейер ленточный реверсивный; 7 – бункер загрузки печей; 8 – питатель ленточный; 9 – печь КС; 10 – аэроохладитель; 11 – котел-утилизатор; 12 – конвейер винтовой; 13 – транспортер цепной; 14 – элеватор ЦБ-350; 15 – транспортер цепной; 16 – бункер крупной фракции; 17 – бункер огарка; 18 – мельница шаровая СМ-604; 19 –конвейер винтовой; 20–камерный насос пневматической; 21 –циклон СИОТ; 22 – конвейер винтовой; 23 – транспортер скребковой; 24 – бункер циклонной пыли; 25 – камерный насос пневматической; 26 – эксгаустер; 27 – коллектор грязного газа; 28 – конвейер винтовой; 29 – камерный насос пневматической; 30–электрофильтр ГК-30; 31–конвейер винтовой; 32– коллектор чистого газа.